

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Stjepan Štavalj

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Stjepan Štavalj

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Dr. sc. Ivici Garašiću, dipl. ing. na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada. Posebno se zahvaljujem asistentu Ivanu Juriću, mag.ing.mech. na velikoj pomoći tijekom izrade diplomskog rada. Zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije jer su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog rada. Također zahvaljujem mojoj obitelji na pomoći i podršci tijekom studiranja.

Stjepan Štavalj



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **STJEPAN ŠTAVALJ** Mat. br.: 0035194009

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena bazičnim praškom punjene žice za zavarivanje čelika visoke čvrstoće**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of basic flux cored wire for welding of high strength steel**

Opis zadatka:

Obzirom na povećane zahtjeve sa stanovišta produktivnosti i kvalitete zavarenih spojeva potrebno je analizirati primjenu praškom punjenih žica za čelike visoke čvrstoće. Dati pregled i klasifikaciju praškom punjenih žica prema odgovarajućim normama s posebnim naglaskom na bazičnim praškom punjene žice. Usporediti operativne značajke rutilnih, bazičnih i metalnim praškom punjenih žica kao i mehanička svojstva metala zavara. Ukratko navesti općenite značajke zavarljivosti čelika visoke čvrstoće.

U eksperimentalnom dijelu na osnovnom materijalu čelika visoke čvrstoće API 5L X80 debljine 10mm propisati tehnologiju zavarivanja bazičnim praškom punjenom žicom. Odrediti optimalne unose topline i pripremu žlijeba uz primjenu keramičke podloške. Detaljno ispitati zavareni spoj i procijeniti homogenost te mehanička svojstva. Procijeniti operativne značajke primijenjenog dodatnog materijala te dati preporuke za primjenu u realnim uvjetima.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:
11. srpnja 2018.
12. srpnja 2018.
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivo Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ:

SADRŽAJ:.....	I
POPIS SLIKA:	III
POPIS TABLICA:	V
POPIS OZNAKA.....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. MIG/MAG ZAVARIVANJE.....	2
2.1. Osnovni principi visokoučinskog MAG zavarivanja	2
3. OPĆENITO O FCAW POSTUPKU ZAVARIVANJA.....	4
3.1. Izvor struje za FCAW postupak zavarivanja.....	5
3.2. Vrste FCAW postupka.....	5
3.3. FCAW – S postupak zavarivanja.....	6
3.4. FCAW – G postupak zavarivanja	6
3.5. Priprema spoja kod FCAW zavarivanja.....	7
3.6. Prednosti FCAW postupka zavarivanja.....	7
3.7. Nedostatci FCAW postupka	8
3.8. Zavarivanje čelika visoke čvrstoće FCAW postupkom zavarivanja.....	8
4. KLASIFIKACIJA PRAŠKOM PUNJENIH ŽICA	9
4.1. Klasifikacija praškom punjenih žica za zavarivanje nelegiranih sitnozrnatih čelika	9
4.1.1. Klasifikacija tipa A	10
4.1.2. Klasifikacija tipa B	15
4.2. Klasifikacija praškom punjenih žica za zavarivanje nehrđajućih i visoko temperaturnih čelika	22
4.2.1. Klasifikacija prema nominalnom sastavu	22
4.2.2. Klasifikacija prema tipu legure	26
5. SASTAV PRAŠKOM PUNJENIH ŽICA	30
5.1. Operativne značajke rutilnih prašaka.....	33
5.2. Operativne značajke bazičnih prašaka	34
5.3. Samozaštitne praškom punjene žice	35
5.4. Metalom punjene žice	36
6. ZNAČAJKE ZAVARLJIVOSTI VISOKOČVRSTIH ČELIKA	37
7. EKSPERIMENTALNI RAD	41

7.1.	Oprema korištena za izradu eksperimentalnog dijela rada	41
7.2.	Osnovni materijal	43
7.3.	Dodatni materijal.....	45
7.4.	Zaštitni plin	45
7.5.	Priprema za zavarivanje čelika API 5L X80	46
7.6.	Zavarivanje čelika API 5L X80, broj stanja pokusa 1	47
7.7.	Zavarivanje čelika API 5L X80, broj stanja pokusa 2	48
7.8.	Zavarivanje čelika API 5L X80, broj stanja pokusa 3	49
7.9.	Analiza postupaka zavarivanja	51
8.	NERAZORNA ISPITIVANJA	52
8.1.	Analiza nerazornih ispitivanja.....	54
9.	ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA	55
9.1.	Ispitivanje udarnog rada loma.....	56
9.2.	Analiza rezultata ispitivanja udarnog rada loma	57
9.3.	Ispitivanje makroizbrusaka.....	58
9.4.	Analiza makroizbrusaka.....	59
9.5.	Mjerenje tvrdoće Vickers metodom	60
9.6.	Analiza mjerenja tvrdoće zavara	64
9.7.	Analiza mikrostrukture	68
10.	PROCJENA OPERATIVNIH KARAKTERISTIKA KORIŠTENOG DODATNOG MATERIJALA.....	72
11.	ZAKLJUČAK.....	73
12.	LITERATURA	75
	PRILOZI	78

POPIS SLIKA:

Slika 1. Shematski prikaz načina prijenosa rastaljenog metala u električnom luku: a) prijenos štrcajućim lukom, b) prijenos u obliku kapljica, c) prijenos rotirajućim lukom, d) prijenos kratkim spojevima [4]	3
Slika 2. Shematski prikaz FCAW – S postupka [3]	6
Slika 3. Shematski prikaz FCAW – G postupka [3]	6
Slika 4. Sustav označavanja praškom punjenih žica prema metodi A	14
Slika 5. Sustav označavanja praškom punjene žice tip B.....	21
Slika 6. Oblici spojeva praškom punjenih žica [12].....	31
Slika 7. Tople pukotine u zavarenom spoju [19]	38
Slika 8. Hladne pukotine u zavarenom spoju [19]	39
Slika 9. Robotska stanica za zavarivanje	42
Slika 10. Fluke S68 uređaj za mjerenje međuprolazne temperature	42
Slika 11. Priprema spoja.....	44
Slika 12. Parametri zavarivanja MEGAFIL punjenim žicama [31]	46
Slika 13. Zavari izvedeni brzinom 20 cm/min, a) korijen, b) drugi prolaz	47
Slika 14. Zavari izvedeni brzinom 35 cm/min, a) korijen, b) drugi prolaz, c) treći prolaz, d) četvrti prolaz.....	48
Slika 15. Zavari izvedeni brzinom 50 cm/min, a) korijen, b) drugi prolaz, c) treći prolaz, d) četvrti prolaz, e) peti prolaz, f) šesti prolaz.....	50
Slika 16. Ploča 3 na radiografskom snimanju	53
Slika 17. Radiogram ploče 1	53
Slika 18. Detalj radiograma ploče 1	53
Slika 19. Radiogram ploče 2	54
Slika 20. Radiogram ploče 3	54
Slika 21. Rezanje ploča plinskim plamenom	55
Slika 22. a) položaj Charpy epruveta na uzorcima 1 i 2, b) priprema makroizbrusaka	55
Slika 23. a) Položaj i orijentacija epruvete, b) Usjek epruvete [34].....	56
Slika 24. Charpy epruvete	56
Slika 25. a) prijelomna površina uzorka 1, b) prijelomna površina uzorka 2	57
Slika 26. Makroizbrusak 1	58
Slika 27. Makroizbrusak 2	58
Slika 28. Makroizbrusak 3	58
Slika 29. Mjerenje tvrdoće	60

Slika 30. Grafički prikaz tvrdoće zavar a 1	64
Slika 31. Grafički prikaz tvrdoće zavar a 2	65
Slika 32. Grafički prikaz tvrdoće zavar a 3	65
Slika 33. Usporedni prikaz tvrdoća na mjernoj liniji 1	66
Slika 34. Usporedni prikaz tvrdoća na mjernoj liniji 2	67
Slika 35. Mikrostruktura ploče 1, a) zavar, b) linija staljivanja, c) zut	68
Slika 36. Mikrostruktura ploče 2, a) zavar, b) linija staljivanja, c) zut	69
Slika 37. Mikrostruktura ploče 3, a) zavar, b) linija staljivanja, c) zut, d) osnovni materijal..	70

POPIS TABLICA:

Tablica 1. Oznake čvrstoće za zavarivanje u više prolaza	10
Tablica 2. Oznake čvrstoće za zavarivanje u jednom prolazu	11
Tablica 3. Oznaka za temperaturu pri kojoj je iznos udarnog rada loma 47 J ili 27J	11
Tablica 4. Oznake kemijskog sastava metala zavara, klasifikacija tipa A	12
Tablica 5. Oznaka vrste praška unutar jezgre elektrode.....	12
Tablica 6 Oznaka položaja zavarivanja.....	13
Tablica 7. Oznaka količine difundiranog vodika u metalu zavara	13
Tablica 8. Oznake svojstva čvrstoće kod zavarivanja u više prolaza.....	16
Tablica 9. Oznake svojstava čvrstoće kod zavarivanja u jednom prolazu	16
Tablica 10. Oznake kemijskog sastava metala zavara, klasifikacija tipa B	17
Tablica 11. Operativne karakteristike, klasifikacija tipa B	18
Tablica 12. Svojstva praškom punjenih žica prema oznakama operativnih karakteristika.....	19
Tablica 13. Oznaka položaja zavarivanja.....	20
Tablica 14. Temperatura predgrijavanja i međuprolazna temperatura.....	20
Tablica 15. Oznake kemijskog sastava metala zavara i pripadajuća mehanička svojstva	23
Tablica 16. Oznaka praškom punjene žice prema sastavu praška u jezgri.....	24
Tablica 17. Oznake položaja zavarivanja.....	24
Tablica 18. Oznake kemijskog sastava metala zavara	26
Tablica 19.Oznaka praškom punjene žice prema sastavu praška u jezgri.....	28
Tablica 20. Oznaka položaja zavarivanja.....	28
Tablica 21. Najčešće korišteni elementi u prašcima FCAW žice. [13].....	32
Tablica 22. Karakteristike izvora struje OTC Daihen DP 400 [26]	42
Tablica 23. Mehanička svojstva čelika API 5L X80 [28][29]	43
Tablica 24. Kemijski sastav čelika API 5L X80 prema certifikatu i ispitivanjima [29]	43
Tablica 25. Priprema spoja [30]	44
Tablica 26. Mehanička svojstva dodatnog materijala T 55 6 Mn1NiMo B M 3 H5 [31].....	45
Tablica 27. Kemijski sastav dodatnog materijala T 55 6 Mn1NiMo B M 3 H5 [31]	45
Tablica 28. Parametri zavarivanja za broj stanja pokusa 1	47
Tablica 29. Parametri zavarivanja za broj stanja pokusa 2	48
Tablica 30. Parametri zavarivanja za stanje pokusa 3.....	49
Tablica 31. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma.....	57

Tablica 32. Dimenzije zavarenih spojeva.....	59
Tablica 33. Izmjerene vrijednosti tvrdoće ploče 1	61
Tablica 34. Izmjerene vrijednosti tvrdoće ploče 2	62
Tablica 35. Izmjerene vrijednosti tvrdoće ploče 3	63

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
W	J	toplina
I	A	jakost električne struje
R	m	duljina
t	s	vrijeme
K_p	%	stupanj punjenja elektrode
m	kg	masa
Q	kJ/mm	unos topline tijekom zavarivanja
U	V	napon
v_z	mm/s	brzina zavarivanja
η	%	stupanj toplinskog iskorištenja postupka zavarivanja
l	mm	udaljenost
HV	vickers	tvrdoća
F	N	sila
d	mm	duljina

SAŽETAK

U ovom je radu analizirana primjena bazičnim praškom punjene žice za zavarivanje visokočvrstih čelika. U teorijskom je dijelu rada analizirana primjena praškom punjenih žica za zavarivanje visokočvrstih čelika. Objašnjen je FCAW postupak zavarivanja uz prednosti i nedostatke u primjeni. Dan je pregled i klasifikacija praškom punjenih žica prema ISO normi. Usporedno su prikazane operativne karakteristike elektroda punjenih bazičnim i rutilnim praškom, te metalom punjenih elektroda. Također analizirana su mehanička svojstva zavara dobivenih navedenim elektrodama. Ukratko su navedene osnovne značajke zavarljivosti visokočvrstih čelika.

U eksperimentalnom je dijelu rada opisan plan zavarivanja čelika API 5L X80 bazičnim praškom punjenom žicom na tri razine unosa topline. Opisana je oprema korištena u eksperimentu, svojstva osnovnog i dodatnog materijala i korišteni zaštitni plin. Ukratko su opisane karakteristike korištenih razornih i nerazornih metoda ispitivanja zavarenih spojeva. Detaljno su opisani načini ispitivanja zavarenih spojeva. Rezultati ispitivanja prikazani su i analizirani u smislu procjene homogenosti i mehaničkih svojstava zavarenih spojeva. Procijenjene su operativne karakteristike korištenog dodatnog materijala za primjenu u realnim uvjetima.

Ključne riječi:

FCAW, visokočvrsti čelici, API 5L X80.

SUMMARY

In this paper is analyzed the application of basic flux cored wires for welding of high strength steel. In the theoretical part of this paper the application of flux cored wire for welding high strength steel is analyzed. The application of FCAW welding process is explained with advantages and disadvantages. Review and classification of flux cored wires according to ISO norms are given too. Operating characteristics of the basic and rutile flux cored wires and metal cored wires are presented comparable. The mechanical properties of the welded joints obtained by flux cored electrodes were also analyzed. Briefly, the basic weldability properties are listed.

Welding procedure specification of steel API 5L X80 with basic flux cored wire on three different heat input levels is described in the experimental part of this paper. Equipment, properties of the basic and additional material and used shielding gas are described. The characteristics of nondestructive testing methods of welded joints are described briefly. Methods used for testing welded joints are described in detail. The test results are presented and analyzed in terms of homogeneity and mechanical properties of welded joints. The operational properties of the additional material used for real conditions applications are estimated.

Key words:

FCAW, high strength steel, API 5L X80.

1. UVOD

Tijekom niza godina korištenja u industriji postupak zavarivanja MIG/MAG dokazao se kao vrlo produktivan i pouzdan postupak spajanja i prevlačenja. Tome u prilog ide velik učin taljenja koji proizlazi iz velike gustoće struje, te pogodnost za automatizaciju kao posljedica automatskog dodavanja žice i regulacije duljine električnog luka. Zahvaljujući mogućem preciznom definiranju parametara, a samim time i vrste prijenosa metala, dinamike taline, te kontrole unosa topline, pridonosi se svestranosti i širokom rasponu primjene ove tehnologije zavarivanja. Ta prilagodljivost posljedica je mogućnosti korištenja raznih kombinacija zaštitnih plinova, tehnika rada, te valnih oblika strujnih i naponskih signala. FCAW postupak zavarivanja razvio se unaprjeđenjem postupka MAG u smislu većeg unosa topline djelovanjem električnog luka, povećanja količine depozita i fizikalnih svojstava zavara. Za zaštitu zavara koristi se prašak iz jezgre elektrode uz mogućnost dodatne zaštite plinom. Kontinuirao dovodenje žičane elektrode omogućava _veliku količinu depozita. Kod zavarivanja u više prolaza troska mora biti uklonjena između prolaza. To može smanjiti produktivnost i uzrokovati uključke troske. Kod FCAW – G postupka poroznost može nastati kao posljedica nedovoljnog protoka plina. Zbog velikih struja, napona i reakcije praška tijekom zavarivanja oslobađaju se znatne količine plinova. Zbog toga su povećani troškovi za ventilacijom i opremom za zaštitu zavarivača. [1,2]

2. MIG/MAG ZAVARIVANJE

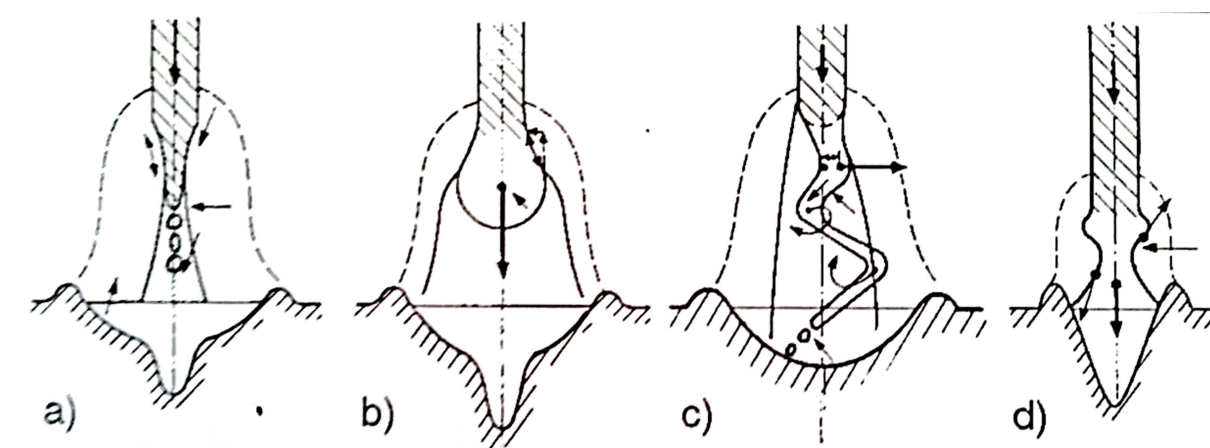
MIG/MAG postupak koristi punu žičanu elektrodu kao dodatni materijal, a zavarivanje se izvodi u vanjskoj zaštiti plina iz vanjskog izvora (obično visokotlačnog cilindra). Zavarivanje se uglavnom izvodi elektrodom spojenom na istosmjerni napon pozitivnog polariteta (DC +). Zaštitni plin, obično ugljikov dioksid ili mješavina ugljikovog dioksida i argona štiti rastaljeni metal od reakcije s atmosferom. Rastaljeni metal zavara vrlo je reaktivan s kisikom, vodikom i dušikom iz atmosfere. [3]

Povećanje učinkovitosti MIG/MAG zavarivanja zahtjeva primjenu različitih načina prijenosa metala u električnom luku, u kombinaciji s odgovarajućim parametrima zavarivanja, plinskim mješavinama i dodatnim materijalima. Optimiranje proizvodnih postupaka i zahtjevi tržišta za povećanjem učinkovitosti već duže vrijeme se osjete i na području primjene tehnoloških postupaka zavarivanja. U tu svrhu postojeći postupci zavarivanja se usavršavaju, a nova tehnološka rješenja dobivaju na značenju. Kvalitetna i široka ponuda uređaja za zavarivanje te dodatnih materijala i zaštitnih plinova važni su faktori u tim procesima. [4]

2.1. Osnovni principi visokoučinskog MAG zavarivanja

Sve postupke zavarivanja MAG, koji imaju mogućnost dodavanja žice (jedne ili više) s brzinama većim od 15 m/min, pojedinačno ili u zbroju nazivamo visokoučinskim postupcima zavarivanja. Povećanje količine nataljenog materijala može se koristiti za povećanje volumena zavara ili za povećanje brzine zavarivanja. Parametri zavarivanja kao što su: brzina dodavanja žice, struja zavarivanja, napon luka, duljina slobodnog kraja žice, zajedno sa značajkama dodatnog materijala i zaštitnog plina određuju obilježja električnog luka za zavarivanje. Povećanje učinkovitosti taljenja temelji se uglavnom na povećanju duljine slobodnog kraja žice. Kod toga se pri istoj brzini dodavanja žice poveća omski otpor, pa struja zavarivanja i dubina penetracije padaju. Zbog toga se mora povećati brzina dodavanja žice kako bi se struja zavarivanja držala konstantnom. Povećanjem struje zavarivanja znatno se povećava zagrijavanje zbog omskog otpora, tako da se na kraju žice razvija temperatura koja jako zagrije žicu i bez utjecaja električnog luka. Povećanje topline u slobodnom kraju žice zbog Jouleovog zakona raste proporcionalno s njenom dužinom, vremenom i kvadratom struje ($W = I^2 R t$). Na taj način kod iste struje prirast taljenja dodatnog materijala može iznositi do 20 %. [4]

U osnovi se kod MAG zavarivanja energija dijeli na slobodni kraj žice i električni luk. Povećanje duljine slobodnog kraja žice dovodi do povećanja udjela taljenja osnovnog i dodatnog materijala. Procesi u električnom luku znatno ovise o ionizacijskim svojstvima zaštitnog plina i vrsti luka. Pravilan izbor vrste zaštitnog plina omogućava u širokom području stabilnost prijenosa dodatnog materijala od elektrode do radnog komada. Način prijenosa dodatnog materijala dijeli se u četiri prijelazna oblika: Štrcajući prijenos, prijenos u obliku kapljica, prijenos rotirajućim lukom i prijenos kratkim spojevima. [4] Slika 1 prikazuje načine prijenosa metala u električnom luku.



Slika 1. Shematski prikaz načina prijenosa rastaljenog metala u električnom luku: a) prijenos štrcajućim lukom, b) prijenos u obliku kapljica, c) prijenos rotirajućim lukom, d) prijenos kratkim spojevima [4]

Visokoučinsko MAG zavarivanje moguće je ostvariti s punim i praškom punjenim žicama. Kod praškom punjenih žica optimalni su promjeri 1,2 i 1,6 mm. Koriste se žice punjene metalnim praškom kao i one koje proizvode veću količinu troske. Kapljičasti prijenos kod praškom punjenih žica sličan je prijenosu kod žica punog presjeka. Rutilne i bazične praškom punjene žice odlikuju se srednjim do velikim kapljicama prijenosa. Za razliku od punih žica kod praškom punjenih žica nije moguće postići rotirajući luk. Primjena praškom punjenih žica moguća je u području štrcajućeg i visokoučinskog luka. Kako bi se postigla stabilnost postupka treba upotrebljavati fino namotane žice koje u dodavanju imaju jednak otpor odmatanja. Visokoučinski postupci koriste se kod zavarivanja nelegiranih i niskolegiranih čelika s granicom razvlačenja do 960 MPa. Visokolegirane čelike moguće je zavariti odgovarajuće legiranim žicama štrcajućim lukom i visokoučinskim kratkospojnim lukom. Visokoučinski MAG postupak zavarivanja moguće je koristiti ondje gdje postoje potrebe i mogućnosti za većom brzinom zavarivanja, za materijale manjih i srednjih debljina. [4]

3. OPĆENITO O FCAW POSTUPKU ZAVARIVANJA

FCAW zavarivanje prvi je put predstavljeno 1950 – ih godina. Uvođenje ovog postupka tehnički nije bilo novo, to je bila nova vrsta elektrode koja se može koristiti na MAG aparatu za zavarivanje. FCAW postupak sličan je MAG postupku zavarivanja. Oba postupka koriste kontinuiranu dobavu žice i sličnu opremu. Aparati za MAG i FCAW zavarivanje identični su. Oba su postupka poluautomatska i imaju visok stupanj proizvodnosti. [5]

FCAW postupak koristi se za zavarivanje metala s visokim udjelom željeza i zavarivanja koja zahtijevaju veliku količinu depozita. Kod velikih struja zavarivanja FCAW postupak daje stabilniji i lakše upravljiv luk u odnosu na MAG zavarivanje u plinskoj zaštiti ugljikovog dioksida. Bolja preglednost taline zavara je kod FCAW postupka. Površina zavara ostaje prekrivena troskom koju je poslije potrebno ukloniti. Kod FCAW postupka izraženije je štrcanje i nastaje više dima. Praškom punjene žice mogu se proizvesti na način da ostvaruju veću količinu depozita i veću penetraciju u odnosu na MAG zavarivanje. Sukladno tome mogu se u kraćem vremenu, tj. jednom prolazu korištenjem deblje žice izvesti zavareni spojevi na debljim materijalima. To povećava produktivnost i smanjuje deformacije zavarenog spoja. FCAW je najproduktivniji ručni postupak zavarivanja. Ovaj je postupak primjenu pronašao prvenstveno u brodogradnji. Brodovi se rade od limova velike debljine na kojima treba napraviti jako puno zavara. FCAW - om se ostvaruju visokokvalitetni zavari, dosta brzo, a zavarivanje samozaštitnim praškom punjenim žicama moguće je i po vjetru. [2, 5]

Kombinirajući veću fleksibilnost postupka s većom stabilnosti luka FCAW postupak za zavarivanje koristi toplinu generiranu električnim lukom istosmjerne struje. Električni luk je uspostavljen između kontinuirano nadolazeće žičane elektrode koja se u električnom luku tali u neposrednoj blizini radnog komada što za rezultat ima taljenje radnog komada i miješanje osnovnog i dodatnog materijala. FCAW je visokoučinski postupak za zavarivanje različitih ugljičnih, niskolegiranih, visokolegiranih, nehrđajućih i duplex čelika. Također koristi se i za navarivanje. FCAW je varijanta MAG procesa zavarivanja i uz brojne sličnosti ova dva postupka postoje i neke temeljne razlike. FCAW postupak nudi veću fleksibilnost sastava legirnog dodatnog materijala od MAG postupka. Također obično omogućuje veće količine depozita i veću stabilnost električnog luka. Druga razlika između FCAW i MAG zavarivanja je u načinu zaštite taline od reakcije s atmosferom. [6]

3.1. Izvor struje za FCAW postupak zavarivanja

Koriste se izvori struje koji imaju „CV“ (eng. constant voltage) strujno naponsku karakteristiku. Ti izvori struje napon drže približno jednakim ili čak konstantnim. Većina izvora struje za FCAW ima radni ciklus 100 % i omogućuje neprekidno zavarivanje, dok izvori struje sa 60 % intermitencijom koji se također koriste omogućuju zavarivanje svakih 6 od 10 minuta radnog ciklusa. FCAW postupak u većini slučajeva koristi veće struje zavarivanja što onda zahtjeva i veće i robusnije izvore struje za zavarivanje. [2]

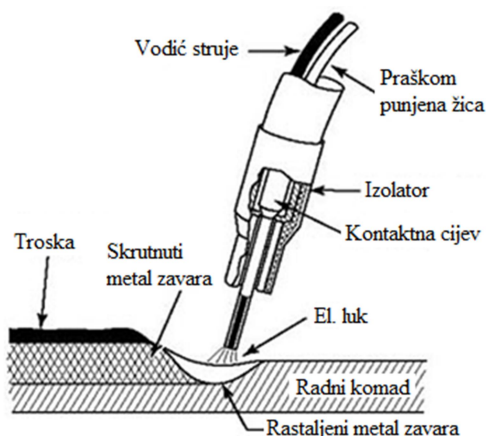
Za FCAW zavarivanje koristi se istosmjerna struja pozitivnog i negativnog polariteta. FCAW elektrode namijenjene su za upotrebu i na pozitivnom i negativnom polaritetu struje. Žice za zavarivanje u dodatnoj zaštiti plina općenito su namijenjene za upotrebu na pozitivnom polaritetu struje. Pozitivan polaritet struje na elektrodi koristi se za deblje elektrode kako bi veća količina topline bila na elektrodi i tako povećala proizvodnost postupka. Pozitivna struja rezultira boljom penetracijom. Neke FCAW – S žice namijenjene su za zavarivanje negativnim polaritetom struje. Negativna struja rezultira slabijom penetracijom i koristi se za zavarivanje tanjih materijala. Zavareni spoj izveden negativnim polaritetom struje je širi i manje nadvišen od zavara izvedenog pozitivnim polaritetom. Kod zavarivanja s elektrodama malog promjera, elektroda se spaja na negativni polaritet struje. [2, 5]

3.2. Vrste FCAW postupka

Razlika je u sastavu praška kojim su punjene elektrode, što pruža različite prednosti. Samozaštitne praškom punjene žice dobre su za rad na terenu budući da prašak unutar žice stvara sigurnu zaštitu čak i u vjetrovitim uvjetima. Nije potreban zaštitni plin iz vanjskog izvora, pa su instalacija i prijenos opreme jednostavniji, brži i lakši. Postupak je najprimjereniji za primjenu na debljim materijalima jer je manje sklon hladnim pukotinama. Zahtjeva precizno podešene parametre zavarivanja. Mala promjena bilo kojeg parametra rezultira velikim promjenama u električnom luku. Također položaj pištolja mora biti dosljedan i pod odgovarajućim kutom. Postupak ima izraženije rasprskavanje i stvara trosku što zahtjeva naknadnu obradu nakon zavarivanja. [3]

3.3. FCAW – S postupak zavarivanja

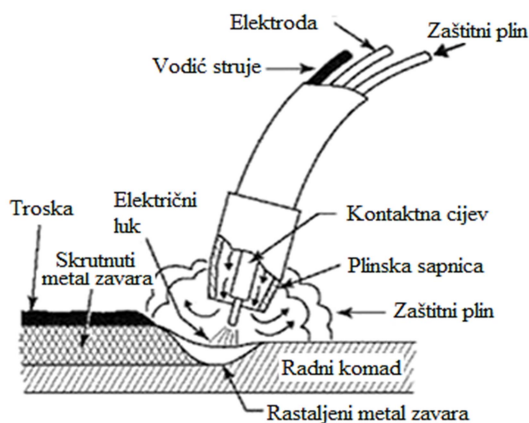
FCAW – S postupak ili kako se još naziva samozaštitna praškom punjena žica koristi se uglavnom kod zavarivanja na terenu, jer nema opasnosti od slabljenja zaštite zavara zbog vjetra. Sastav praška FCAW – S elektroda je takav da od atmosfere štiti i rastaljeni metal zavara i kapljicu tijekom prijenosa s vrha elektrode kroz električni luk u talinu zavara. [2] Slika 2 shematski prikazuje FCAW – S postupak zavarivanja.



Slika 2. Shematski prikaz FCAW – S postupka [3]

3.4. FCAW – G postupak zavarivanja

FCAW – G postupak zavarivanja osigurava bolju zaštitu od FCAW – S postupka, zbog sekundarne zaštite plinom iz vanjskog izvora. Također pomaže zadržavanje taline unutar žlijeba kod prisilnih položaja zavarivanja, povećava učinkovitost i omogućuje dublju penetraciju. [2] Slikom 3 je prikazan FCAW – G postupak zavarivanja.



Slika 3. Shematski prikaz FCAW – G postupka [3]

3.5. Priprema spoja kod FCAW zavarivanja

Priprema spoja kod FCAW zavarivanja ne zahtjeva detaljnu pripremu kao i kod MAG zavarivanja. FCAW zavarivanje može se obavljati na grubljoj pripremi površine žlijeba, čak i kroz tanji sloj korozije. U brodogradnji se ovime mogu postići velike uštede u vidu smanjenja vremena pripreme spoja. Također često se koriste keramičke podloške kod jednostranog zavarivanja. Podloške omogućuju dobru kontrolu oblika korijena zavara i sigurnost provara korijena. Nakon zavarivanja odstranjivanje podloške je jednostavno. Valja napomenuti kako ništa ne može zamijeniti kvalitetnu pripremu površine žlijeba. Koliko god prašci unutar žice omogućavaju fleksibilnost, potrebno je voditi računa o čistoći žlijeba za zavarivanje i čistoći mjesta priključka mase, kako ne bi došlo do neželjenih padova napona, što uzrokuje česte pogreške u zavarenim spojevima. [5, 3]

3.6. Prednosti FCAW postupka zavarivanja

Glavne su prednosti FCAW zavarivanja smanjeni troškovi i veća količina depozita u odnosu na MAG zavarivanje. Troškovi su smanjeni iz razloga što se legirni elementi jednostavno dodaju u jezgru žice u obliku praška, dok su kod punih žica legirani u čeliku od kojeg se žica izrađuje. FCAW zavarivanje je idealno za spojeve na kojima nema zahtjeva za naknadnu obradu lica zavara. FCAW – S postupak može se koristiti za zavarivanje većine konstrukcija od konstrukcijskih čelika. Tako izvedeni zavari postižu višu čvrstoću, ali sniženu duktilnost u odnosu na zavare izvedene FCAW – G postupkom. Kod zavarivanja u dodatnoj zaštiti ugljičnog dioksida manja je opasnost od poroznosti i ostvaruje se veća penetracija. FCAW postupak zavarivanja ima veće tolerancije na nečistoće, a zavarivanje se odvija većim brzinama u odnosu na MAG postupak zavarivanja. Elektrodamalnih promjera zavarivanje je moguće u svim položajima. FCAW – S postupak ne zahtjeva zaštitu plinom. Žica se kontinuirano dovodi pa se malo vremena troši na izmjenu elektroda. Samozastitne praškom punjene žice omogućuju dobru zaštitu površine zavara, što FCAW postupak čini pogodnim za zavarivanje u vjetrovitim i prljavim okolišima koji se susreću u primjenama za zavarivanje na terenu. Praškom punjena žica daje veće tolerancije na nepravilnosti površine žlijeba, odnosno priprema spoja manje je zahtjevnana nego za MAG zavarivanje. Troska pomaže zadržavanje taline pri zavarivanju u prisilnim položajima. Ovaj postupak daje zavare visoke kvalitete. [2]

3.7. Nedostaci FCAW postupka

Kod ovog postupka zavarivanja potrebno je uklanjati trosku nakon svakog prolaza i na kraju zavarivanja, što zahtjeva dodatno vrijeme. Pri zavarivanju se stvara veća količina dimnih plinova u odnosu na MAG zavarivanje. Postupak ima nešto izraženije rasprskavanje, što može rezultirati potrebom za naknadnom obradom zavarenog spoja. Praškom punjena žica skuplja je od pune žice. Većina niskolegiranih i nelegiranih FCAW elektroda, više je osjetljiva na točnost parametara zavarivanja. Korištenje CV izvora struje i dodavača žice s konstantnom brzinom potrebno je za održavanje konstantnog napona luka. [2]

3.8. Zavarivanje čelika visoke čvrstoće FCAW postupkom zavarivanja

Dodatni materijali koji se koriste za zavarivanje cijevi visoke čvrstoće moraju zadovoljavati zahtjeve mehaničkih i kemijskih svojstava osnovnog materijala uz zadovoljavajuću duktilnost zbog smanjenja učestalosti pukotina. Također trebaju podnijeti ekstremne temperature kojima su cjevovodi obično izloženi, jer utjecaj toplinskog širenja ili kontrakcije uslijed mraza i/ili drugih utjecaja okoliša može lako oštetiti čelik i zavarene spojeve. Specijalno oblikovanje cjevovoda i pripreme spojeva, te pravilan odabir dodatnog materijala, osigurat će potrebnu kvalitetu spojeva kod takvih uvjeta eksploatacije. [7]

Do danas, nekoliko se klasifikacija samozaštitnih praškom punjenih žica pokazalo uspješnim pri zavarivanju cjevovoda visoke čvrstoće širom svijeta. Ove žice su posebno formulirane tako da stvaraju nisku razinu rasprskavanja i lako uklonjivu trosku kako bi se ubrzalo čišćenje između prolaza i poslije zavarivanja. Budući da ne zahtijevaju zaštitu plinom, mogu eliminirati vrijeme i uopće potrebu za postavljanjem štitnika radi zaštite od vjetra kako nebi došlo do otpuhivanja zaštitnog plina. Osim toga, neke samozaštitne praškom punjene žice imaju dobre karakteristike kod vertikalnog zavarivanja prema dolje, što je značajna prednost kod zavarivanja cjevovoda na terenu. FCAW elektrode za zavarivanje u svim položajima stvaraju trosku koja se brzo skrutne i pomaže zadržavanje taline u prisilnim položajima zavarivanja. To omogućuje zavarivanje u prisilnim položajima većim naponima i strujama što rezultira većom količinom depozita i dubljom penetracijom. Elektrode za zavarivanje niskolegiranih čelika, primjenjuju se za zavarivanje niskolegiranih i visokočvrstih čelika. Moguće zavarivanje niskolegiranih čelika, legiranih: molibdenom, niklom, krom – molibden, mangan – molibden, te visokočvrstih kaljenih i popuštenih čelika. Kombinacija vanjske zaštite plinom i sastava praška jezgre, ostvaruje zavare visoke čvrstoće. [7]

4. KLASIFIKACIJA PRAŠKOM PUNJENIH ŽICA

U ovom je poglavlju klasifikacija samozaštitnih praškom punjenih žica i praškom punjenih žica za zavarivanje pod zaštitom plina za elektrolučno zavarivanje nelegiranih sitnozrnatih čelika prema normi ISO 17632 i klasifikacija samozaštitnih praškom punjenih žica i praškom punjenih žica za zavarivanje pod zaštitom plina za elektrolučno zavarivanje nehrđajućih i visoko temperaturnih čelika prema normi ISO 17633.

4.1. Klasifikacija praškom punjenih žica za zavarivanje nelegiranih sitnozrnatih čelika

Ovaj standard daje klasifikacijski sustav za praškom punjene žice u pogledu vlačne čvrstoće, udarnog rada loma, kemijskog sastava metala zavara, tipu jezgre elektrode, upotrebe zaštitnog plina i položaja zavarivanja. Iznos vlačne čvrstoće dodatnog materijala za zavarivanje općenito je veći od čvrstoće osnovnog materijala. Korisnici bi trebali imati na umu da usklađivanje čvrstoće dodatnog materijala za zavarivanje s čvrstoćom osnovnog materijala neće nužno odgovarati.

Oznake klasifikacije temelje se na dva pristupa za označavanje svojstava čvrstoće i udarnog rada loma metala zavara dobivenog određenom elektrodom. Dva pristupa označavanja uključuju dodatne oznake za različite zahtjeve klasifikacije. Klasifikacija obuhvaća sva svojstva metala zavara dobivena praškom punjenom žicom u mogućoj kombinaciji sa zaštitnim plinom.

4.1.1. Klasifikacija tipa A

Klasifikacija prema granici razvlačenja i udarnom radu loma od 47 J (u daljnjem tekstu klasifikacija tipa A), podijeljena je na osam dijelova:

- a) oznaka (T) označava praškom punjenu žicu
- b) drugi dio oznake označava čvrstoću i istezljivost metala zavara kod zavarivanja u više prolaza odnosno čvrstoću osnovnog materijala korištenog za klasifikaciju kod zavarivanja u jednom prolazu
- c) treći dio oznake označava svojstva udarnog rada loma zavarenog spoja
- d) četvrti dio oznake označava kemijski sastav metala zavara
- e) peti dio oznake označava sastav praška u jezgri elektrode
- f) šesti dio oznake označava upotrebu i vrstu zaštitnog plina
- g) sedmi dio oznake označava preporučeni položaj zavarivanja
- h) osmi dio oznake označava količinu difundiranog vodika u metalu zavara.

Obavezne oznake u klasifikaciji sadrže simbole za vrstu elektrode, čvrstoću, udarni rad loma, kemijski sastav, tip jezgre elektrode i zaštitni plin. Neobavezne oznake sadrže oznake položaja zavarivanja za koje je elektroda namijenjena i oznaku za količinu difundiranog vodika u metalu zavara. Potpuna oznaka mora se koristiti na pakiranjima, u literaturi i katalozima proizvođača dodatnih materijala.

Oznaka praškom punjene žice za elektrolučno zavarivanje je slovo T. Oznake svojstava čvrstoće metala zavara odnosno zavarenog spoja za elektrode pogodne za zavarivanje u više prolaza dane su u tablici 1. Za svaku je oznaku navedena granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i istezanje.

Tablica 1. Oznake čvrstoće za zavarivanje u više prolaza

Oznaka	Granica razvlačenja, MPa	Vlačna čvrstoća, MPa	Minimalno istezanje, % debljine u mm
35	355	440 – 570	22
38	380	470 – 600	20
42	420	500 – 640	20
46	460	530 – 680	20
50	500	560 – 720	18

Za praškom punjene žice namijenjene zavarivanju u jednom prolazu oznake u tablici 2 označavaju čvrstoću zavarenog spoja u korelaciji sa osnovnim materijalom.

Tablica 2. Oznake čvrstoće za zavarivanje u jednom prolazu

Oznaka	Minimalna granica razvlačenja osnovnog materijala, MPa	Minimalna vlačna čvrstoća zavarenog spoja, MPa
3T	355	470
4T	420	520
5T	500	600

Oznake u tablici 3 označavaju minimalnu temperaturu pri kojoj udarni rad loma iznosi 47 J. Kada je metal zavara klasificiran za određenu temperaturu, on automatski pokriva sve više temperature navedene u tablici.

Tablica 3. Oznaka za temperaturu pri kojoj je iznos udarnog rada loma 47 J ili 27J

Oznaka	Temperatura u °C pri kojoj je udarni rad loma 47 J ^{ab} ili 27 J ^c
Z ^a	Nema zahtjeva
A ^b ili Y ^c	+ 20
0	0
2	- 20
3	- 30
4	- 40
5	- 50
6	- 60
7	- 70
8	- 80
9	- 90
10	- 100
^a oznaka Z koristi se za elektrode za zavarivanje u jednom prolazu ^b klasifikacija prema udarnom radu loma 47 J ^c klasifikacija prema udarnom radu loma 27 J	

Oznake kemijskog sastava metala zavara prema granici razvlačenja i udarnom radu loma od 47 J dane su u tablici 4. Kemijski sastav elektrode za pojedinu oznaku detaljno je objašnjen u normi ISO 17632.

Tablica 4. Oznake kemijskog sastava metala zavara, klasifikacija tipa A

Oznake sastava:	1NiMo	Mo	MnMo	1Ni	1,5Ni	2Ni	3Ni	Mn1Ni	Bez oznake
-----------------	-------	----	------	-----	-------	-----	-----	-------	------------

Oznake sastava jezgre elektrode i operativnih karakteristika elektrode dane su u tablici 5. Označavaju različite vrste praškom punjenih žica obzirom na sastav praška unutar jezgre i vrsti troske. Proizvođači daju i preporuku za upotrebu na određenom polaritetu struje. U tablici oznaka „n“ označava više prolaza.

Tablica 5. Oznaka vrste praška unutar jezgre elektrode

Oznaka	Vrsta praška, svojstva	Broj prolaza	Zaštitni plin
R	Rutilni, sporoskrutnjujuća troska	1 ili n	Potreban
P	Rutilni, brzoskrutnjujuća troska	1 ili n	Potreban
B	Bazični	1 ili n	Potreban
M	Metalni	1 ili n	Potreban
V	Rutilni ili bazični fluorid	1	Nije potreban
W	Bazični fluorid, sporoskrutnjujuća troska	1 ili n	Nije potreban
Y	Bazični fluorid, brzoskrutnjujuća troska	1 ili n	Nije potreban
Z	Ostali tipovi	-	-

Oznaka zaštitnog plina. Oznaka „C“ označava potrebnu zaštitu čistim ugljikovim dioksidom. Oznaka „M“ označava potrebnu zaštitu plinskom mješavinom prema normi ISO 14175 – M2, ali bez helija. Oznaka „N“ znači da zaštita plinom nije potrebna.

Oznaka položaja zavarivanja u korelaciji je sa oznakama iz norme DIN EN ISO 6947. Oznake položaja zavarivanja dane su u tablici 6.

Tablica 6 Oznaka položaja zavarivanja

Oznaka	Položaji zavarivanja
1	PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG
2	PA, PB, PC, PD, PE, PF
3	PA, PB
4	PA
5	PA, PB, PG
PA – vodoravni položaj PB – vertikalni položaj PC – zidni položaj PD – horizontalno nadglavni položaj PE – nadglavni položaj PF – zavarivanje vertikalno prema gore PG – zavarivanje vertikalno prema dolje	

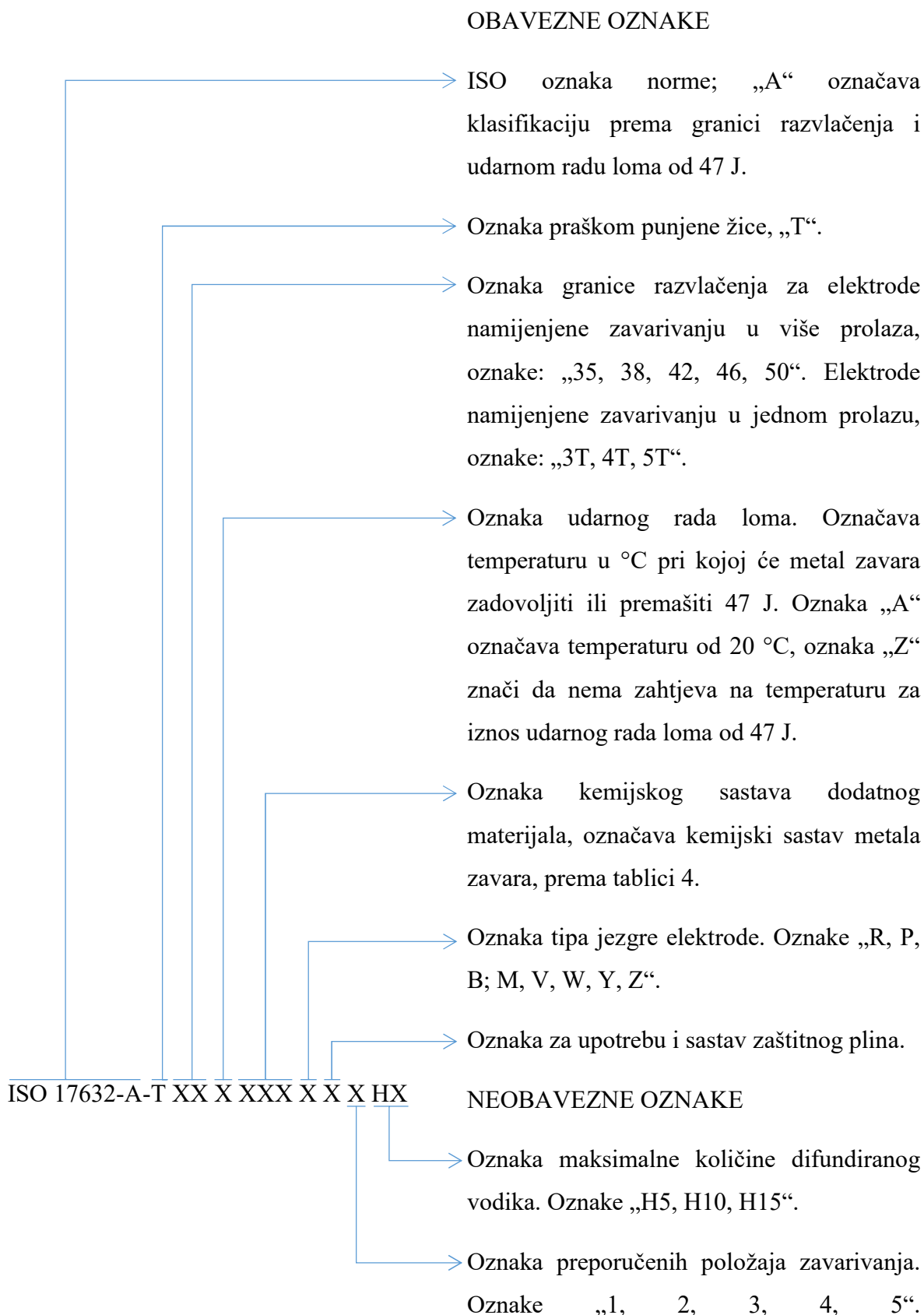
Oznake maksimalne količine difundiranog vodika u metalu zavara dane su u tablici 7.

Tablica 7. Oznaka količine difundiranog vodika u metalu zavara

Oznaka	Količina difundiranog vodika, ml/100 g nataljenog depozita, maks.
H5	5
H10	10
H15	15

Ako je navedena oznaka „H“ proizvođač mora navesti u kojim je uvjetima ostvaren maksimalni iznos difundiranog vodika te koje je uvjete potrebno zadovoljiti kod skladištenja dodatnog materijala, struju, napon, duljinu slobodnog kraja žice, polaritet elektrode i vrstu zaštitnog plina.

Kod zavarenih spojeva s udarnim radom loma od 47 J, predgrijavanje i naknadna toplinska obrada nije potrebna. Međuprolaznu temperaturu potrebno je održavati ispod 250 °C. Na slici 4 prikazan je sustav označavanja praškom punjenih žica prema metodi A.



Slika 4. Sustav označavanja praškom punjenih žica prema metodi A

4.1.2. Klasifikacija tipa B

Klasifikacija prema vlačnoj čvrstoći i udarnom radu loma od 27 J, u daljnjem tekstu klasifikacija tipa B. Klasifikacija je sastavljena u 9 dijelova:

- a) prvi dio „T“ označava praškom punjenu žicu.
- b) drugi dio oznake označava čvrstoću metala zavara kod zavarivanja u jednom ili u više prolaza
- c) treći dio oznake označava svojstva udarnog rada loma zavarenog spoja. Dodatna oznaka U na kraju oznake elektrode označava da metal zavara ima prosječni udarni rad loma od 47 J na propisanoj temperaturi ispitivanja
- d) četvrti dio oznake označava operativne karakteristike elektrode
- e) peti dio oznake označava preporučeni položaj zavarivanja
- f) šesti dio oznake označava zaštitni plin. Dodatna oznaka S odnosi se na elektrodu za zavarivanje u jednom prolazu
- g) sedmi dio oznake označava potrebu za toplinskom obradom osnovnog materijala prije (A) i/ili nakon (P) zavarivanja. Oznaka AP označava potrebu za toplinskom obradom prije i nakon zavarivanja
- h) Osmi dio oznake označava kemijski sastav metala zavara
- i) Deveti dio oznake označava količinu difundiranog vodika u metalu zavara

Klasifikacija se sastoji od obaveznog i neobaveznog dijela oznake. Obavezni dio oznake uključuje oznaku elektrode, oznaku čvrstoće u stanju prije ili nakon toplinske obrade, oznaku preporučenih položaja zavarivanja, oznaku operativnih karakteristika, oznaku zaštitnog plina, oznaku udarnog rada loma i oznaku kemijskog sastava metala zavara. Neobavezan dio oznake uključuje oznaku „U“ koja označava zavareni spoj sa prosječnim udarnim radom loma od 47 J pri ispitivanoj temperaturi i oznaku količine difundiranog vodika.

Oznake svojstava čvrstoće metala zavara odnosno zavarenog spoja za elektrode pogodne za zavarivanje u jednom i više prolaza dane su u tablici. U tablici 8 su navedene vrijednosti čvrstoće i istezanja kod zavarivanja u više prolaza. U tablici 9 navedene vrijednosti čvrstoće i istezanja kod zavarivanja u jednom prolazu.

Tablica 8. Oznake svojstva čvrstoće kod zavarivanja u više prolaza

Oznaka	Granica razvlačenja, MPa	Vlačna čvrstoća, MPa	Minimalno istezanje, % debljine u mm
43	330	430 – 600	20
49	390	490 – 670	18
55	460	550 – 740	17
57	490	570 – 770	17

Tablica 9. Oznake svojstava čvrstoće kod zavarivanja u jednom prolazu

Oznaka	Minimalna vlačna čvrstoća zavarenog spoja, MPa
43	430
49	490
55	550
57	570

Oznake koje označavaju minimalnu temperaturu pri kojoj je iznos udarnog rada loma 27 J, navedene su u tablici 3 (ekvivalentna je tablici za udarni rad loma 47 J).

Oznake kemijskog sastava metala zavara prema granici razvlačenja i udarnom radu loma od 27 J dane su u tablici. Kemijski sastav elektrode za pojedinu oznaku detaljno je objašnjen u normi ISO 17632.

Tablica 10. Oznake kemijskog sastava metala zavara, klasifikacija tipa B

OZNAKA KEMIJSKOG SASTAVA
BEZ OZNAKE
K
2M3
3M2
N1
N2
N3
N5
N7
CC
NCC
NCC1
N1M2
N2M2
N3M2
G

Oznake operativnih karakteristika i svojstva praškom punjenih žica klasifikacija tipa B, prikazuju tablice 11 i 12. U tablici oznaka „n“ označava zavarivanje u više prolaza.

Tablica 11. Operativne karakteristike, klasifikacija tipa B

Oznaka	Zaštitni plin	Polaritet struje	Prijenos dodatnog materijala u el luku	Tip jezgre	Položaj zavarivanja	Broj prolaza
T1	Potreban	DC +	Štrcajućim lukom	Rutilna	0 ili 1	1 ili n
T2	Potreban	DC +	Štrcajućim lukom	Rutilna	0	1
T3	Nije potreban	DC +	Krupno kapljičasti prijenos	Nije definirana	0	1
T4	Nije potreban	DC +	Krupno kapljičasti prijenos	Bazična	0	1 ili n
T5	Potreban	DC +	Krupno kapljičasti prijenos	Vapneni fluorid	0 ili 1	1 ili n
T6	Nije potreban	DC +	Štrcajućim lukom	Nije definirana	0	1 ili n
T7	Nije potreban	DC -	Sitnim kapima ili štrcajućim lukom	Nije definirana	0 ili 1	1 ili n
T8	Nije potreban	DC -	Sitnim kapima ili štrcajućim lukom	Nije definirana	0 ili 1	1 ili n
T10	Nije potreban	DC -	Sitnim kapima	Nije definirana	0	1
T11	Nije potreban	DC -	Štrcajućim lukom	Nije definirana	0 ili 1	1 ili n
T12	Potreban	DC +	Štrcajućim lukom	Rutilna	0 ili 1	1 ili n
T13	Nije potreban	DC -	Kratkim spojevima	Nije definirana	0 ili 1	1
T14	Nije potreban	DC -	Štrcajućim lukom	Nije definirana	0 ili 1	1
T15	Potreban	DC +	Štrcajućim lukom	Metalom punjena	0 ili 1	1 ili n
TG	Sastav ovisi o dogovoru proizvođača i kupca					

Tablica 12. Svojstva praškom punjenih žica prema oznakama operativnih karakteristika

Oznaka	Svojstva praškom punjenih žica prema oznakama operativnih karakteristika
T1	Mali gubitci zbog rasprskavanja, ravan do blago konveksan zavar, velika količina depozita
T2	Slično kao T1, zavar sadrži više mangana i/ili silicija što poboljšava svojstava
T3	Pogodna za vrlo velike brzine zavarivanja
T4	Velika količina depozita, velika otpornost zavarenog spoja prema toplim pukotinama, ali slaba penetracija
T5	Blago konveksan zavar, tanak sloj troske koji ne prekriva površinu zavora u potpunosti, dobra svojstva unosa topline i otpornost prema hladnim i toplim pukotinama u usporedbi s T1.
T6	Dobra svojstva unosa topline, dobra svojstva protaljivanja korijena, lako uklanjanje troske čak i kod zavarivanja dubokog korijena
T7	Velika količina nataljenog depozita i izvrsna otpornost prema toplim pukotinama
T8	Velika količina taline pri niskim temperaturama
T10	Velike brzine zavarivanja bez obzira na debljinu osnovnog materijala
T11	Namijenjene zavarivanju tankih materijala
T12	Slično kao T1, poboljšana svojstva taljenja elektrode, niži udio mangana
T13	Zavarivanje korijenskih prolaza bez korištenja podloške
T14	Zavarivanje velikim brzinama čak i na prevučenim materijalima
T15	Jezgra je sastavljena od metalnih legiranih elemenata ili željeznog praška, ima minimalnu količinu troske

Tablica 13 prikazuje oznake položaja zavarivanja kojima su elektrode namijenjene.

Tablica 13. Oznaka položaja zavarivanja

Oznaka	Položaji zavarivanja
0	PA, PB
1	Svi položaji

Oznake maksimalne količine difundiranog vodika u metalu zavara navedene su u tablici 7.

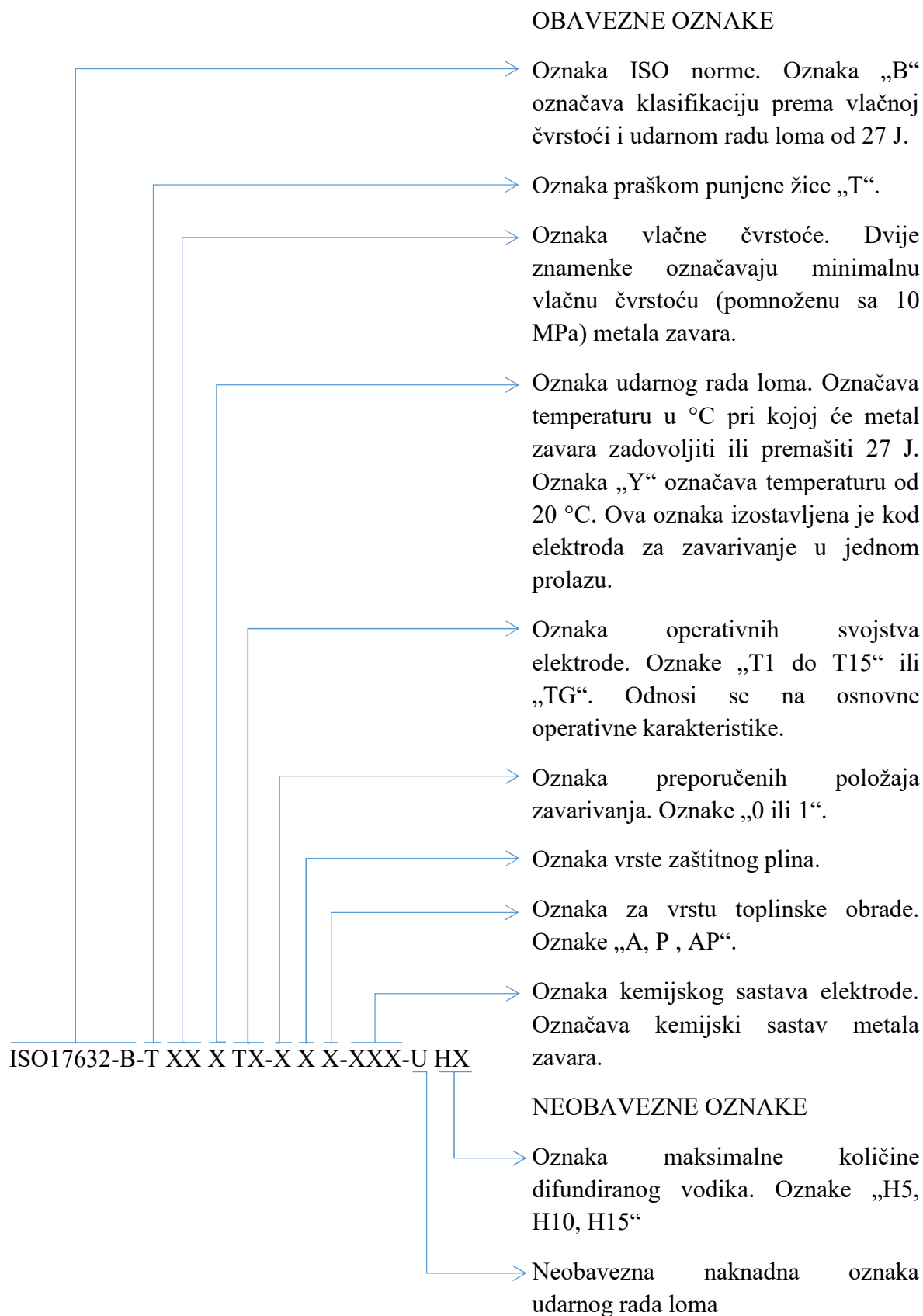
Oznaka zaštitnog plina. Oznaka „C“ označava potrebnu zaštitu čistim ugljikovim dioksidom. Oznaka M označava potrebnu zaštitu plinskom mješavinom prema ISO 14175 – M2, ali bez helija. Oznaka N znači da nije potrebna zaštita plinom.

U tablici 14 navedene su oznake koje označavaju zahtijevanu temperaturu predgrijavanja i međuprolaznu temperaturu. Odabir temperature predgrijavanja i međuprolazne temperature očitava se prema odgovarajućoj oznaci.

Tablica 14. Temperatura predgrijavanja i međuprolazna temperatura

Oznaka	Temperatura predgrijavanja, °C	Međuprolazna temperatura, °C
Bez oznake, K	Sobna temperatura	150 ± 15
2M3, 3M2, N1, N2, N3, N5, N7, CC, NCC, NCC1, N1M2, N2M2, N3M2	≥ 100	

Na slici 5 prikazan je sustav označavanja praškom punjenih žica prema metodi B.



Slika 5. Sustav označavanja praškom punjene žice tip B

4.2. Klasifikacija praškom punjenih žica za zavarivanje nehrđajućih i visoko temperaturnih čelika

Klasifikacija samozaštitnih praškom punjenih žica i praškom punjenih žica za zavarivanje pod zaštitom plina za elektrolučno zavarivanje nehrđajućih i visoko temperaturnih čelika prema normi ISO 17633.

Oznake klasifikacije temelje se na dva pristupa označavanju kemijskog sastava metala zavara dobivenog odgovarajućom elektrodom.

Pristup prema "nominalnom sastavu" koristi sastavne elemente koji ukazuju izravno na nominalne razine određene legure, dane prema određenom redoslijedu i neke oznake niskih, ali značajnih udjela drugih elemenata koji se ne izražavaju kao cijeli brojevi.

Pristup prema "tipu legure" koristi troznamenaste ili četveroznamenaste oznake za određene skupine legiranih elemenata uz povremenu dodatnu oznaku ili znakove za kompozicijske modifikacije svake izvorne legure unutar pojedine skupine.

U većini slučajeva, određena se praškom punjena žica može označavati pomoću oba sustava. U tom se slučaju jedna ili obje oznake mogu koristiti za klasifikaciju žice.

4.2.1. Klasifikacija prema nominalnom sastavu

Ova je klasifikacija podijeljena na 5 dijelova:

- a) oznaka (T) označava praškom punjenu žicu
- b) drugi dio oznake označava kemijski sastav metala zavara
- c) treći dio oznake označava sastav praška u jezgri elektrode
- d) četvrti dio oznake označava vrstu zaštitnog plina
- e) peti dio oznake označava položaj zavarivanja.

Obavezne oznake u klasifikaciji sadrže simbole za vrstu elektrode, kemijski sastav metala zavara, tip jezgre elektrode i zaštitni plin. Neobavezne oznake su oznake položaja zavarivanja u kojima je elektroda primjenjiva. Potpuna oznaka mora se koristiti na pakiranjima, u literaturi i katalozima proizvođača dodatnih materijala.

Oznaka praškom punjene žice za elektrolučno zavarivanje je slovo T. Oznake kemijskog sastava metala zavara navedene su u tablici 15. Kemijski sastav elektrode za pojedinu oznaku detaljno je objašnjen u normi ISO 17633.

Tablica 15. Oznake kemijskog sastava metala zavara i pripadajuća mehanička svojstva

Oznaka legure prema nominalnoj kompoziciji	Najmanja garantirana čvrstoća, MPa	Najmanja vlačna čvrstoća, MPa	Najmanja istezljivost, % debljine u mm	Toplinska obrada nakon zavarivanja
13	250	450	15	a
13 Ti	250	450	15	a
13 4	500	750	15	b
17	300	450	15	c
19 9 L	320	510	30	Nije potrebna
19 9 Nb	350	550	25	
19 12 3 L	320	510	25	
19 12 3 Nb	350	550	25	
19 13 4 N L	350	550	25	
22 9 3 N L	450	550	20	
18 6 5 N L	300	480	25	
18 8 Mn	350	500	25	
20 10 3	400	620	20	
23 12 L	350	510	25	
23 12 2 L	320	550	25	
29 9	450	650	15	
22 12 H	350	550	25	
25 20	350	550	20	
^a Zavar treba biti zagrijan na temperaturu između 730 °C i 760 °C, držan na toj temperaturi 2 sata, nakon toga hlađen u peći do temperature 600 °C i hlađen na zraku.				
^b Zavar treba zagrijati na temperaturu 590 °C do 620 °C, držati 2 sata i ohladiti na zraku				
^c Zavar treba zagrijati na temperaturu 760 °C do 790 °C, držati na toj temperaturi 2 sata, u peći ohladiti do 600 °C i ohladiti na zraku.				

Oznake sastava jezgre elektrode i operativnih karakteristika elektrode dane su u tablici 16. Označavaju različite vrste praškom punjenih žica obzirom na sastav praška u jezgri i vrstu troske.

Tablica 16. Oznaka praškom punjene žice prema sastavu praška u jezgri

Oznaka	Vrsta praška, obilježje
R	Rutilna, sporoskrutnjujuća troska
P	Rutilna, brzoskrutnjujuća troska
M	Metalni prašak
U	Samozaštitna praškom punjena žica
Z	Ostale vrste

Oznake zaštitnog plina „M, C i I“ odnose se na zaštitne plinove prema normi ISO 14174. Oznaka „M“ znači da je potrebna zaštita plinskom mješavinom iz grupe M2 prema normi ISO 14175, ali bez helija. Oznaka N znači da nije potrebna zaštita plinom.

Oznaka položaja zavarivanja u korelaciji je sa oznakama iz norme DIN EN ISO 6947. Oznake položaja zavarivanja dane su u tablici 17.

Tablica 17. Oznake položaja zavarivanja

Oznaka	Položaji zavarivanja
1	PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG
2	PA, PB, PC, PD, PE, PF
3	PA, PB
4	PA
5	PA, PB, PG
PA – vodoravni položaj PB – vertikalni položaj PC – zidni položaj PD – horizontalno nadglavni položaj PE – nadglavni položaj PF – zavarivanje vertikalno prema gore PG – zavarivanje vertikalno prema dolje	

U normi ISO 17633 također su dane vrijednosti temperatura predgrijavanja i međuprolazne temperature za određene vrste legura.

Primjer oznake praškom punjene žice za zavarivanje nehrđajućeg ili visoko temperaturnog čelika prema nominalnom sastavu:

Potpuna oznaka: **ISO 17633-A - T 19 12 3L R M 3**

Obavezni dio znake: **ISO 17633-A - T 19 12 3L R M**

Gdje je:

ISO 17633-A - oznaka broja ISO standarda za klasifikaciju prema nominalnom sastavu

T - oznaka praškom punjene žice za elektrolučno zavarivanje

19 12 3L - oznaka koja predstavlja kemijski sastav metala zavara

R - je oznaka vrste praška unutar jezgre elektrode

M - je oznaka zaštitnog plina

3 - je oznaka položaja zavarivanja za koje je elektroda namijenjena

4.2.2. Klasifikacija prema tipu legure

Klasifikacija praškom punjenih žica za zavarivanje nehrđajućih i visoko temperaturnih čelika prema tipu legure.

Ova je klasifikacija podijeljena na 5 dijelova:

- a) prvi dio oznake označava praškom punjenu žicu
- b) drugi dio oznake označava kemijski sastav metala zavara
- c) treći dio oznake označava sastav praška u jezgri elektrode
- d) četvrti dio oznake označava vrstu zaštitnog plina
- e) peti dio oznake označava položaj zavarivanja.

Obavezne oznake u klasifikaciji sadrže simbole za vrstu elektrode, kemijski sastav metala zavara, tip jezgre elektrode i zaštitni plin. Neobavezna oznaka je oznaka položaja zavarivanja u kojima je elektroda primjenjiva. Potpuna oznaka mora se koristiti na pakiranjima, u literaturi i katalozima proizvođača dodatnih materijala.

Prvi dio oznake praškom punjene žice za elektrolučno zavarivanje može biti „TS“ ili „T“. Slovo „T“ oznaka je za praškom punjenu žicu, a druga moguća oznaka „S“ označava da je sastav legure nehrđajućeg ili visoko temperaturnog čelika.

Oznake kemijskog sastava metala zavara navedene su u tablici 18. Kemijski sastav elektrode za pojedinu oznaku detaljno je objašnjen u normi ISO 17633.

Tablica 18. Oznake kemijskog sastava metala zavara

Oznaka prema tipu legure	Najmanja vlačna čvrstoća	Najmanja istezljivost, % debljine u mm	Naknadna toplinska obrada
307	590	25	Nije potrebna
308	550	30	
308L	520	30	
308H	550	30	
308Mo	550	30	
308LMo	520	30	

308HMo	550	30	
309	550	25	
309L	520	25	
309Mo	550	15	
309LMo	520	15	
309LNb	520	25	
310	550	25	
312	660	15	
316	520	25	
316L	485	25	
316H	520	25	
316LCu	485	25	
317	550	20	
317L	520	20	
318	520	20	
347	520	25	
347L	520	25	
409	450	15	
409Nb	450	15	a
410	480	15	a
410NiMo	760	10	b
430	450	15	c
430Nb	450	13	c
16 – 8 – 2	520	25	Nije potrebna
2209	690	15	
2553	760	13	

^a zavar treba biti zagrijan na temperaturu između 730 °C i 760 °C, držan na toj temperaturi 1 sat, nakon toga hlađen u peći do temperature 315 °C i hlađen na zraku.

^b Zavar treba zagrijati na temperaturu 590 °C do 620 °C, držati 1 sat i ohladiti na zraku.

^c zavar treba zagrijati na temperaturu 760 °C do 790 °C, držati na toj temperaturi 2 sata, u peći ohladiti do 600 °C i ohladiti na zraku.

Oznake sastava jezgre elektrode i svojstva elektrode dane su u tablici 19. Označavaju različite vrste praškom punjenih žica obzirom na sastav praška u jezgri i vrstu troske.

Tablica 19. Oznaka praškom punjene žice prema sastavu praška u jezgri

Oznaka	Svojstva žice
F	Praškom punjena žica
M	Metalom punjena žica
R	Punjene žice za TIG zavarivanje

Oznake zaštitnih plinova:

Oznaka „M“ znači da elektroda zahtjeva zaštitu plinskom mješavinom M21 prema normi ISO 14175, ali ograničenu na Ar + 20 % – 25 % CO₂.

Oznaka „B“ znači da se elektrodom može zavarivati pod zaštitom plinske mješavine M21 (kao kod oznake M) i pod zaštitom plina C1 prema ISO 14175, što je ugljikov dioksid.

Oznaka „A“ znači da se elektrodom može zavarivati pod zaštitom plinske mješavine iz grupe M13 prema normi ISO 14175; sastava argon + do 3 % kisika.

Oznaka „I“ znači da se elektrodom može zavarivati pod zaštitom plina iz grupe I1 prema normi ISO 14175, što je čisti argon.

Oznaka „G“ označava nespecificirane zaštitne plinove.

Oznaka položaja zavarivanja u korelaciji je sa oznakama iz norme DIN EN ISO 6947. Oznaka položaja zavarivanja prikazana je tablicom

Tablica 20. Oznaka položaja zavarivanja

Oznaka	Položaji zavarivanja
0	PA, PB
1	Svi položaji

Primjer oznake praškom punjene žice za zavarivanje nehrđajućeg ili visoko temperaturnog čelika prema tipu legure:

ISO 17633-B - TS316L-FM0

Gdje je:

ISO 17633-B oznaka broja ISO standarda za klasifikaciju prema tipu legure

TS oznaka praškom punjene žice od nehrđajućeg čelika za elektrolučno zavarivanje

316L oznaka koja predstavlja kemijski sastav metala zavara

F oznaka koja govori o vrsti jezgre elektrode

M oznaka zaštitnog plina

0 oznaka položaja zavarivanja za koje je elektroda namijenjena.

5. SASTAV PRAŠKOM PUNJENIH ŽICA

Punjene žice se sastoje od metalnog plašta i jezgre u obliku praška. Osnovne funkcije metalnog plašta su stvaranje metalnog depozita metala zavora, oblikovanje žice i prijenos električne struje. Prašak može biti na bazi: metala, minerala, dezoksidanasa i dodataka, zbog čega ima slične karakteristike kao obloga kod obloženih elektroda. Prašak omogućava dekontaminaciju metala zavora, dezoksidaciju, legiranje, veću stabilnost električnog luka, oblikovanje troske. Kemijski sastav metala plašta punjene žice uglavnom je isti kao i kemijski sastav materijala za čije zavarivanje je žica namijenjena. Prašak u jezgri žice može biti mineralnog, rutilnog ili bazičnog tipa. Postoje i metalom punjene žice. Prašak iz jezgre žice, omogućava opterećenja većim strujama zavarivanja i mikrolegiranjem poboljšava svojstva metala zavora. Troska nastala od praška iz jezgre žice zadržava talinu u prisilnim položajima zavarivanja. Metalni prašak nema takva svojstva, ali njegov kemijski sastav poboljšava zavarivačka svojstva. [10, 11]

Stupanj punjenja kod praškom punjenih žica predstavlja omjer mase jezgre (praška) i ukupne mase praškom punjene žice. Prvenstveno ovisi o načinu izrade, ali i o obliku presjeka žice i u većini slučajeva se kreće od 14 % do 20 %, a ponekad i preko 25 % (kod visokolegiranih žica za zavarivanje). Stupanj punjenja bitno utječe na produktivnost, a time i na cijenu praškom punjene žice. Izračunava se prema izrazu (1) [11]:

$$K_p = \left(\frac{m_p}{m_z} = \frac{m_p}{m_p + m_t} \right) * 100 \% \quad (1)$$

gdje je:

m_p – masa punjenja

m_t – masa obloge (plašta)

m_z – masa žice.

Praškom punjena žica mora se skladištiti na suhom mjestu. Ako nisu skladištene na suhom mjestu prašak može povući vlagu što će za posljedicu imati poteškoće u zavarivanju i pogreške u zavarenim spojevima. Zavareni spoj dobiven FCAW postupkom je otporniji na oksidaciju od zavora dobivenog MAG postupkom. Visokočvrsti čelici su podložni vodikovoj krhkosti, pa elektrode za zavarivanje koje mogu sadržavati vlagu, prije upotrebe treba sušiti. Difundirani vodik ulazi u rešetku materijala i uzrokuje vodikovu krhkost. Elektrode za te

materijale imaju specijalne prevlake s malim udjelom vodika, a dobavljaju se u zatvorenim paketima otpornim na vlagu. [2]

S obzirom da je prostor unutar žice ograničen, prašci moraju biti jako sitni. Prašak je prije izrade žice potrebno miješati i drobiti kako bi izbjegli segregacije elemenata iz praška. Također traka iz koje se izrađuje žica mora biti izuzetno čista. Praškom punjene žice uzduž osi mogu biti spojene sučeljeno ili preklopnim spojem. Žica je obično od niskougličnog čelika ili legiranog (stupanj legiranja ovisi o primjeni) čelika koji čini plašt oko jezgre praškastih i legirajućih elemenata. Kompozicija praška jezgre ovisi o vrsti i proizvođaču žice. Proizvođači općenito smatraju da je točan sastav praškom punjenih elektroda njihova zakonom zaštićena informacija. [12] Slika 6 prikazuje najčešće oblike spojeva kod izrade praškom punjenih žica.



Slika 6. Oblici spojeva praškom punjenih žica [12]

Glavni zadaci sastojaka praškaste jezgre su [12]:

- osigurati mehanička, metalurška i korozijska svojstva metala zavara
- osigurati kvalitetan i čvrst metal zavara, štiteći talinu od kisika i dušika iz zraka
- odstraniti nečistoće iz taline pomoću reakcija izazvanih taljenjem praška iz jezgre
- stvoriti pokrivnu trosku koja pri hlađenju štiti metal zavara od zraka i kontrolira oblik i izgled zavara u raznim položajima zavarivanja za koje je elektroda predviđena
- stabilizirati električni luk da bi se smanjilo rasprskavanje i olakšalo taljenje te dobio zavareni spoj propisanih dimenzija i homogenosti
- stvaranje dezoksidanata koji pomažu u izvlačenju nečistoća iz metala zavara i stvaranje čvrstih, homogenih zavarenih spojeva
- dodavanje legiranih elemenata što poboljšava čvrstoću i ostala svojstva metala zavara
- stvaranje plinske zaštite. Žice koje zahtijevaju dodatnu plinsku zaštitu ne sadrže u jezgri dovoljno elemenata koji bi stvorili odgovarajuću plinsku zaštitu.

Najčešće korišteni elementi u prašku FCAW žice navedeni su u tablici 21.

Tablica 21. Najčešće korišteni elementi u prašcima FCAW žice. [13]

ELEMENT	OBLIK PRISUTNOSTI	FUNKCIJA
Aluminij	Metalni prašak	Dezoksidator, element za denitrifikaciju
Cirkonij	Oksid ili metalni prašak	Dezoksidator, element za denitrifikaciju, formira trosku
Kalcij	Minerali poput CaF_2 ili CaCO_3	Stvara plinsku zaštitu i formira trosku
Kalij	Minerali sa silikatima, glinenci	Stabilizira el. luk i formira trosku
Krom	Ferolegura ili željezni prašak	Poboljšava tvrdoću, čvrstoću i korozijsku otpornost, te smanjuje istezljivost
Mangan	Ferolegura (feromangan) ili metalni prašak	Dezoksidator, spaja se sa sumporom (MnS), povećava tvrdoću i čvrstoću, formira trosku
Molibden	Ferolegura	Povećava tvrdoću, čvrstoću, a kod austenitnih nehrđajućih čelika povećava otpor rupičastoj koroziji (pitingu)
Natrij	Silikatni minerali	Stabilizira el. luk, formira trosku
Nikal	Metalni prašak	Povećava tvrdoću, čvrstoću, žilavost i korozijsku otpornost
Silicij	Ferosilicij/ferolegura ili silicij – mangan, minerali silicija	Dezoksidator, formira trosku
Titan	Ferotitan, minerali, rutilni prašak	Dezoksidator, element za denitrifikaciju, formira trosku, stabilizira ugljik kod nekih nehrđajućih čelika
Ugljik	Element ferolegura, kao feromangan	Povećava tvrdoću i čvrstoću
Vanadij	Oksid ili metalni prašak	Povećava čvrstoću
Željezo	Ferolegura ili željezni prašak	Legirajuća matrica depozita na bazi željeza, legura kod baze nikla i ostalih ne željeznih taloga

5.1. Operativne značajke rutilnih prašaka

Za žice punjene rutilnim praškom karakterističan je prijenos metala štrcajućim lukom, mali gubitci uslijed rasprskavanja i rutilni tip troske koji u potpunosti prekriva metal zavara. Praškom punjene žice kod kojih rutilna troska sporo skrutne namijenjene su za zavarivanje u jednom ili više prolaza u položenom i zidnom položaju zavarivanja. Ova vrsta žica općenito je namijenjena za upotrebu pod zaštitnom čistog ugljikovog dioksida. Posebna vrsta ovih punjenih žica kod kojih je rutilna troska takvog sastava da brzo skrutne kako bi omogućila zavarivanje u svim položajima obično su manjih promjera. Plinske mješavine argona i ugljikovog dioksida također se mogu koristiti u svrhu poboljšanja prijenosa metala u električnom luku i smanjenje rasprskavanja, odnosno poboljšanje operativnih karakteristika. [8]

Komponente jezgre žice punjene rutilnim mineralnim praškom tvore trosku sastavljenu od rutila, aluminosilikata, kalcijevog oksida, fluorida i potrebnih dezoksidanata (najčešće se koriste FeMn, Al, TiO_2). Jezgra rutilnim praškom punjenih žica sadrži više od 50 % rutila (TiO_2), koji je vrlo dobar ionizator i stabilizator električnog luka. Kod rutilnim praškom punjenih žica koje se primjenjuju za zavarivanje u vodoravnom položaju, sadržaj rutila doseže i do 65 % ukupnog sastava jezgre. [11]

Zavareni spojevi izvedeni žicom punjenom rutilnim praškom imaju vrlo dobra mehanička svojstva. Ugljik - manganovi čelici zavarivani takvom žicom imaju zadovoljavajući udarni rad loma čak i pri temperaturi od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kod zavarivanja visokolegiranih čelika nužno je koristiti žicu punjenu rutilnim praškom legiranu sa 2,5 % nikla, kako bi zavareni spoj imao zadovoljavajući udarni rad loma pri temperaturi od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. [11] Metal zavara ima veći sadržaj kisika i vodika što za posljedicu ima manju istezljivost i veću sklonost pojavi pukotina. Zato je primjena ovih žica ograničena na limove tanje od 45 mm. Za postizanje veće vrijednosti udarnog rada loma na niskim temperaturama kod tih žica često se koristi mikrolegiranje borom i titanom [10].

5.2. Operativne značajke bazičnih prašaka

Za žice punjene bazičnim praškom karakterističan je prijenos metala u električnom luku krupnim kapima, blago konveksan zavar i troska koja ne prekriva u potpunosti površinu zvara. Ove se praškom punjene žice primarno upotrebljavaju za zavarivanje u položenom i zidnom položaju. Plinska zaštita može biti čistim ugljikovim dioksidom ili plinskim mješavinama kojima je osnova argon. Troska ovih elektroda sastavljena je od fluorida i lužnatih metalnih oksida. Komponente jezgre žice punjene bazičnim mineralnim praškom su najčešće: TiO_2 , CaO , CaF_2 . [8, 11]

Zavari izvedeni ovim elektrodama imaju izvrsna svojstva udarnog rada loma i otpornost prema pukotinama. Pri zavarivanju žicama punjenim bazičnim praškom postiže se bolja kvaliteta zavarenog spoja nego pri zavarivanju žicama punjenim rutilnim praškom. Najveći doprinos kvaliteti daje bazična troska koja nastaje u procesu zavarivanja i iz rastaljenog materijala izvlači nečistoće i komponente koje tvore dostatnu količinu plinova koji štite talinu zvara od utjecaja atmosfere te na taj način sprječavaju nastanak poroznosti. [11]

Ove žice se koriste za zavarivanje najzahtjevnijih konstrukcija. Zbog niske sklonosti ka stvaranju pukotina pri upotrebi nema ograničenja s aspekta debljine limova. Zavari izvedeni ovim elektrodama imaju odlične mehaničke karakteristike i udarni rad loma pri niskim temperaturama. Troska kod ovih žica zbog prisutnih fluorida skrutne sporije što otežava zavarivanje u prisilnim položajima. Izgled zvara je grublji, a rasprskavanje veće. Rasprskavanje je moguće smanjiti upotrebom zaštitnih plinskih mješavina. Rasprskavanje materijala najveće je kod zavarivanja uz zaštitu ugljikovog dioksida, ali je znatno manje uz zaštitu plinske mješavine argona i ugljikovog dioksida, najčešće u omjeru 82 % Ar i 12 % CO_2 . Bazičnim praškom punjene žice zahtijevaju vrlo precizno namještanje parametara zavarivanja. [10]

5.3. Samozaštitne praškom punjene žice

Posebno poglavlje u obitelji praškom punjenih žica predstavljaju žice koje ne trebaju dodatnu zaštitu plinom tijekom zavarivanja. Većina samozaštitnih praškom punjenih žica ima jezgru bazičnog tipa što znači da su glavni sastojci kalcijev karbonat i kalcijev fluorid. Tehnologija izrade i sastav jezgre samozaštitnih praškom punjenih žica posebno su složen problem koji dobro poznaju samo proizvođači. [11]

Prema normi ISO 17632, samozaštitne praškom punjene žice u oznaci klasifikacije imaju oznaku V, W ili Y.

Elektrode punjene praškom tipa V koriste se za zavarivanje bez dodatne zaštite plinom, a prijenos metala u električnom luku odvija se sitnim kapima do štrcajućim lukom. Rutilni ili bazično-fluoridni sastav troske ovih praškom punjenih žica omogućuje sporo ili brzo skrućivanje troske. Elektrode sa sporoskrutnjujućom troskom koriste se za zavarivanje galvaniziranih, čelika prevučenih aluminijem ili drugih prevučenih čelika u svim položajima zavarivanja. Elektrode sa brzoskrutnjujućom troskom koriste se za automatizirana zavarivanja velikim brzinama. Ove se elektrode koriste za zavarivanje u jednom prolazu u položenom, zidnom položaju i pozicijama s ograničenim kutom pristupa. Neke od ovih elektroda s praškom tipa V preporučuju se za zavarivanje materijala debljine do 5 mm. Neke su konstruirane za zavarivanje korijenskih prolaza cjevovoda svih promjera i debljina. [8]

Elektrode punjene praškom tipa W koriste se za zavarivanje bez dodatne zaštite plinom. Prijenos dodatnog materijala u električnom luku odvija se sitnim kapima do kvazi štrcajućim lukom. Bazično-fluoridni sastav troske omogućava vrlo velike količine nataljenog depozita. Neke od ovih elektroda punjene su metalnim praškom i imaju dobre operativne karakteristike. Zavari izvedeni ovim elektrodama imaju izuzetno nizak udio sumpora i vrlo su otporni na pukotine. Ove praškom punjene žice koriste se za zavarivanje u jednom i više prolaza u položenom i zidnom položaju. Neke od ovih elektroda namijenjene su za zavarivanje vertikalno prema dolje. [8]

Elektrode punjene praškom tipa Y koriste se za zavarivanje bez dodatne zaštite plinom. Prijenos dodatnog materijala odvija se kvazi štrcajućim lukom. Bazično-fluoridni sastav troske ovih elektroda namijenjen je za zavarivanje u jednom i više prolaza u svim položajima. Zavari izvedeni ovim elektrodama izuzetno su otporni na pukotine i imaju dobra svojstva udarnog rada loma pri niskim temperaturama. [8]

5.4. Metalom punjene žice

Žice punjene metalnim praškom karakterizira prijenos metala štrecajućim lukom u vrlo sitnim kapima i minimalna količina troske. Prašak u jezgri ovih elektroda sastoji se od legiranih elemenata metala i željeznog praška zajedno sa stabilizatorima električnog luka. To ovim elektrodama omogućuje velike količine nataljenog depozita uz potpuno staljivanje osnovnog i dodatnog materijala. Manja poroznost zavora, odlična zavarljivost, izuzetno malo rasprskavanje materijala pri dovoljnoj količini zaštitnog plina i odgovarajućim parametarima zavarivanja obilježja su ovih elektroda. Vrlo su pogodne za zavarivanje kutnih zavora i za zavarivanje popune u više prolaza jer nema čišćenja troske. Mogućnost ekonomičnog utjecaja na sastav jezgre pomoću udjela komponenata punjenja. Približno 20 % veći učinak taljenja nego pri zavarivanju ostalim punjenim žicama. Veća penetracija zbog veće jakosti struje zavarivanja. Koeficijent iskorištenja od 85 % do 95 %, koji kod žica sa troskom iznosi 75 % do 90 %. Širok i stabilan električni luk i lako ponovno uspostavljanje luka. Ravnomjeran i jednoličan izgled zavora. Primjenjivost pri automatskim postupcima zavarivanja i mogućnost zavarivanja u prisilnim položajima. [8, 10, 11]

Ove se elektrode prvenstveno koriste pod zaštitom plinskih mješavina argona i ugljikovog dioksida za zavarivanje u položenom i zidnom položaju. Zavarivanje u ostalim položajima također je moguće pri manjim vrijednostima struja zavarivanja ili korištenjem impulsnih struja za zavarivanje. [8]

Pri izradi žica punjenih metalnim praškom moguće je djelovati na njihov kemijski sastav koji je uglavnom isti kao kod osnovnog materijala za čije se zavarivanje i primjenjuju. Te se žice pretežno upotrebljavaju za zavarivanje visokolegiranih čelika koji na niskim temperaturama imaju visoku čvrstoću i udarni rad loma, te za čelike otporne na puzanje. [11]

Za sitnozrnate čelike i čelike visoke čvrstoće najviše se upotrebljavaju bazičnim praškom punjene žice, ali u posljednje vrijeme djelomično ih zamjenjuju metalnim praškom punjene žice. Kod zavarivanja metalnim praškom punjenim žicama na zavaru se javljaju samo manji tragovi oksida. Pri zavarivanju punjenim žicama koje stvaraju trosku primjenjuje se desna tehnika rada, a pri zavarivanju metalom punjenim žicama uglavnom lijeva tehnika rada. Pri zavarivanju metalom punjenim žicama najveća penetracija postiže se kod sučeljenih spojeva desnom tehnikom rada, a kod zavarivanja kutnih spojeva lijevom tehnikom rada. [10]

6. ZNAČAJKE ZAVARLJIVOSTI VISOKOČVRSTIH ČELIKA

Istraživanje zavarljivosti je kompleksan problem koji uz krajnju ozbiljnost pristupa, zahtjeva i visoku razinu znanja te veliko praktično iskustvo u području zavarivanja. Pod pojmom zavarljivosti podrazumijeva se dobivanje homogenih zavarenih spojeva odgovarajućih mehaničkih i ostalih svojstava primjenom uobičajene ili specijalne tehnologije zavarivanja. [14]

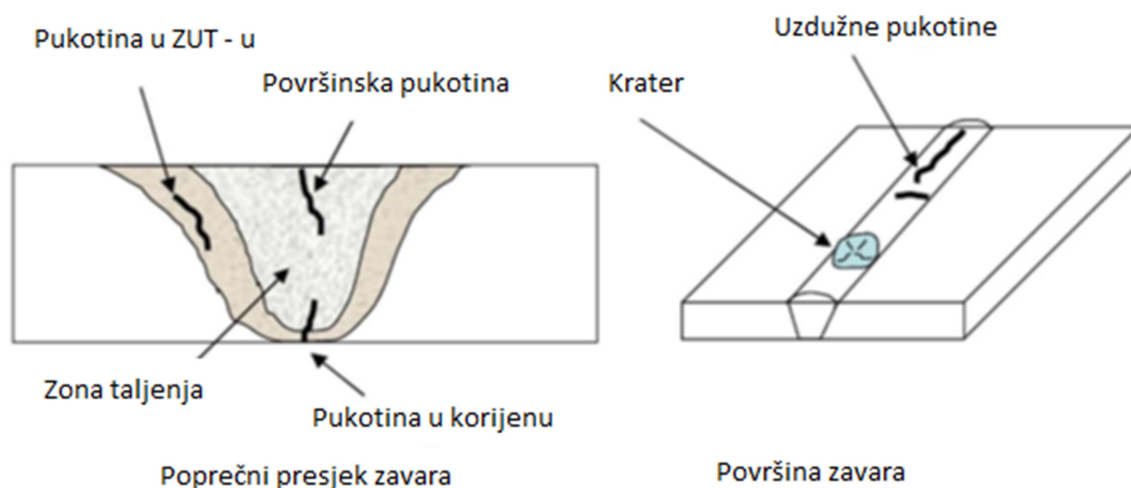
Zavarljivost se općenito može izraziti kao skup faktora koji utječu na sposobnost zavarivanja, postizanje kvalitetnog zavarenog spoja, pouzdanu eksploataciju zavarenog proizvoda u zahtijevanom vijeku trajanja. Pogodnost za zavarivanje obuhvaća niz elemenata kao što su priprema za zavarivanje (određivanje temperature predgrijavanja, kemijskog sastava, debljine materijala i dr.), određivanje postupka i parametara zavarivanja te potrebe za naknadnom toplinskom obradom. Kvalitetu zavarenog spoja moguće je izraziti usporedbom svojstava osnovnog materijala i zavarenog spoja. Što je zavarljivost nekog materijala lošija, kod zavarivanja je izraženija razlika u svojstvima osnovnog materijala i zavarenog spoja. [15, 16]

Ne postoji jedinstvena metoda ispitivanja zavarljivosti. Za ispitivanje i ocjenu zavarljivosti koristi se niz metoda od kojih svaka služi za određivanje pojedinih svojstava zavarljivosti. Procjena zavarljivosti čelika pomoću ekvivalenta ugljika (C_{ekv}). Ekvivalent ugljika, C_{ekv} , daje procjenu zakaljivosti određenog čelika. Zavarljivost čelika najčešće se procjenjuje pomoću ekvivalenta ugljika. Mogućnost pojave martenzita i drugih tvrdih mikrostrukturnih faza direktno je povezana s ekvivalentom ugljika i brzinom hlađenja čelika s temperatura iznad temperatura transformacija. Mogućnost pojave tvrdih i krhkih mikrostrukturnih faza veća je što je viši ekvivalent ugljika i veća brzina hlađenja. To je jako važno kod čelika povišene čvrstoće, ali i kod ostalih čelika koji pokazuju sklonost prema zakaljivanju i pojavi hladnih pukotina [17].

Ugljik ima veliki utjecaj na strukturu i mehanička svojstva čelika. Budući da u velikoj mjeri povećava tvrdoću i čvrstoću čelika, ugljik ima glavni utjecaj na zavarljivost. Sa stajališta zavarljivosti poželjno je imati što niži udio ugljika u čeliku ($C \leq 0,20 \%$), odnosno što niži ekvivalent ugljika. Čelici sa ekvivalentom ugljika manjim od 0,45 smatraju se zavarljivima i za njih uglavnom već postoje poznati parametri zavarivanja. [15, 17]

Pukotine koje se mogu pojaviti pri zavarivanju čelika mogu se podijeliti na nekoliko načina. Najčešća podjela pukotina u zavarenim spojevima je prema mjestu pojavljivanja i prema načinu nastanka.

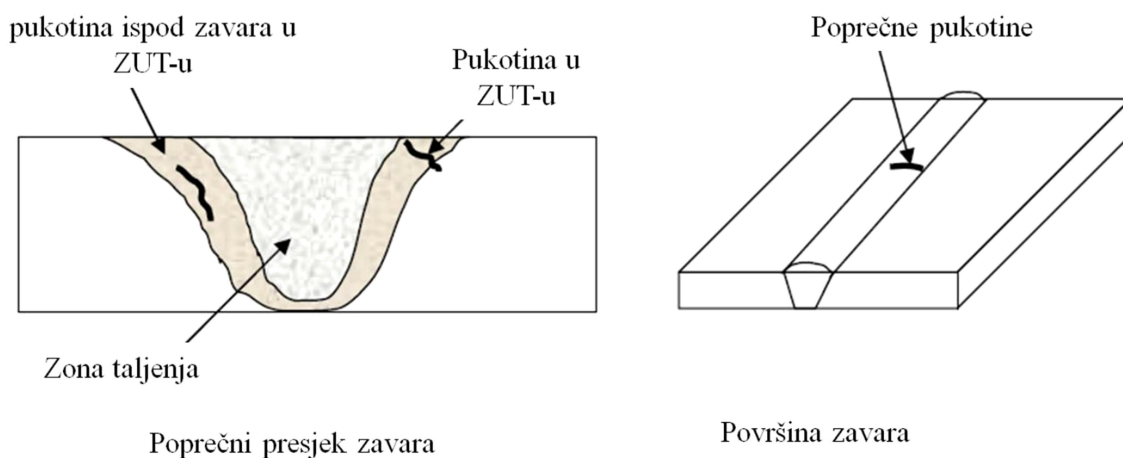
Tople pukotine nastaju pri kristalizaciji i hlađenju zavarenog spoja. Kod čelika je to od temperature kristalizacije do približno 900 °C. Nastaju odmah nakon skrućivanja u metalu zvara uslijed nastanka segregacija pojedinih legiranih elemenata i/ili nečistoća, koje se stvaraju u procesu skrućivanja taline. U uvjetima toplinskih naprezanja tijekom hlađenja zavarenog spoja, različite segregacije kao mjesta inicijacije pukotina osnovni su uzročnik nastajanja ove vrste pukotina. Ograničavanje udjela legiranih elemenata koji imaju veliku tendenciju stvaranja segregacija jedan je od načina prevencije toplih pukotina. Temperatura taline također ima utjecaj na pojavu i veličinu segregacija. Temperatura taline regulira se unosom topline pri zavarivanju. Mjesto nastanka ovih pukotina je najčešće u zoni utjecaja topline, ali se isto tako mogu pojaviti i u zoni taljenja zavarenog spoja, slika 7. [18, 19]



Slika 7. Tople pukotine u zavarenom spoju [19]

Hladne pukotine nastaju pri hlađenju zavarenog spoja na temperaturama nižim od 200 °C, a mogu nastati nekoliko dana nakon zavarivanja. Kod čelika koji pokazuju sklonost pojavi hladnih pukotina kontrolu kvalitete potrebno je provoditi barem 48 sati nakon zavarivanja metodama bez razaranja. Hladne pukotine nastaju u zavaru i u zoni utjecaja topline. Mogu biti orijentirane u smjeru uzdužne osi, okomito ili pod nekim kutom u odnosu na uzdužnu os zavarenog spoja, prikazano na slici 8. U praksi se najčešće susreću hladne pukotine.

Osnovni uzroci nastajanja hladnih pukotina su sklonost materijala zakaljivanju, postojanje zaostalih naprezanja i količina difundiranog vodika [19, 18]



Slika 8. Hladne pukotine u zavarenom spoju [19]

Zavarljivost mikrolegiranih čelika osnovni je problem pri njihovoj uporabi. Problemu zavarljivosti može se pristupiti s raznih stajališta: metalurškog, konstrukcijskog i izvedbenog. Metalurška zavarljivost čelika se često izražava preko ekvivalenta ugljika. [20, 21] Osim izračunavanja ekvivalenta ugljika, kod mikrolegiranih čelika je potrebno dodatnim ispitivanjima ocijeniti njihovu zavarljivost. Uz jednaki ekvivalent ugljika, kod različitih debljina i sadržaja vodika u zavaru, mikrolegirani čelici imaju različitu osjetljivost prema hladnim pukotinama. Zato je kod mikrolegiranih čelika potrebno ispitati sklonost nastajanju toplih i hladnih pukotina, sklonost nastajanju lamelarnih pukotina, osjetljivost zavara i zone utjecaja topline prema krhkom lomu i sklonost nastajanju pukotina uslijed žarenja za redukciju zaostalih naprezanja. [22]

Unesena topline pri zavarivanju je jedan od važnijih čimbenika koji utječe na svojstva zavarenog spoja. Proizvođači čelika često daju i preporuke za optimalan iznos unosa topline pri zavarivanju određenog čelika. Na osnovi definiranog iznosa unosa topline mogu se odrediti struja, napon i brzina zavarivanja, ovisno o postupku zavarivanja. [23]

Na strukturu, a time i na svojstva zone utjecaja topline i metala zavara, presudan utjecaj ima vrijeme hlađenja između temperatura 800 i 500 °C ($t_{8/5}$). U tom se temperaturnom intervalu odvija većina mikrostrukturnih pretvorbi u čeliku, koje bitno utječu na njegova svojstva. U literaturi se često koriste TTT – dijagrami iz kojih se na osnovi poznate vrijednosti $t_{8/5}$ zaključuje o mikrostrukтури nastaloj pri hlađenju zavarenog spoja. Pri tome treba naglasiti da

temperatura austenitizacije u zavarenom spoju nije konstantna kao na TTT – dijagramima, pa se dobivene vrijednosti uzimaju kao orijentacijske. [23]

Prilikom zavarivanja čelika visoke čvrstoće na prvom mjestu javlja se problem pojave pukotina. Pukotine se prema mjestu pojavljivanja mogu podijeliti na one koje se pojavljuju u metalu zavora i osnovnom materijalu koje mogu biti i u zoni utjecaja topline. [14]

Najznačajniji metalurški uzroci nastajanja pukotina u metalu zavora su prevelika brzina hlađenja zavarenog spoja i strukturne transformacije u zavarenom spoju odnosno nastajanje krhkih mikrostrukturnih faza. [14]

Najznačajniji metalurški uzroci nastajanja pukotina u osnovnom materijalu su kemijski sastav materijala, prisutnost vodika i nastajanje unutrašnjih naprezanja zbog temperaturnih ciklusa pri zavarivanju. [14]

7. EKSPERIMENTALNI RAD

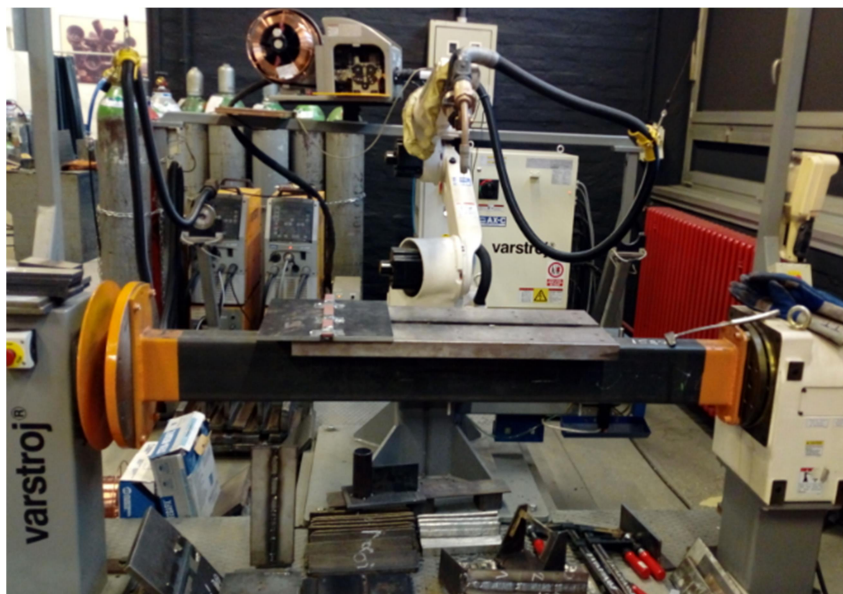
U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je zavarivanje osnovnog materijala API 5L X80 bazičnim praškom punjenom žicom (postupak 136 prema EN ISO 4063:2012) na tri različite razine unosa topline. Zavarivanje je provedeno na robotskoj stanici u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Uzorci su zavareni sučeljenim spojem, položaj PA prema EN 287:2012, uz primjenu keramičke podloške i zaštitne plinske mješavine sastava 82 % Ar i 18 % CO₂. Provedeno je ispitivanje mehaničkih svojstava odgovarajućim razornim i nerazornim metodama ispitivanja i procijenjena homogenost zavarenih spojeva. Cilj eksperimenta je procjena operativnih značajki dodatnog materijala i primjena u realnim uvjetima.

Eksperiment je proveden u 2 dijela. U prvom je dijelu nakon definiranja parametara provedena priprema spojeva i zavarivanje ploča. U drugom je dijelu eksperimenta ispitivanje nerazornim metodama, procjena homogenosti zavarenog spoja, izrada ispitnih uzoraka i ispitivanje mehaničkih svojstava razornim metodama.

Tijekom zavarivanja u različitim je stanjima pokusa varirala brzina zavarivanja i na taj su način ostvarene promjene razina unosa topline. Ostali parametri bili su konstantni u sva tri stanja pokusa. Zadana je jakost struje od 300 A. Tijekom procesa zavarivanja struja je varirala oko te vrijednosti, točne su vrijednosti prikazane tablicama 28, 29 i 30. Temperatura predgrijavanja za čelik API 5L X80 računata prema Ito Bessyo metodi nije potrebna (sobna temperatura). Međuprolazna temperatura održavana je ispod 100 °C.

7.1. Oprema korištena za izradu eksperimentalnog dijela rada

Ploče su zavarivane robotiziranim FCAW postupkom zavarivanja na robotskoj stanici prikazanoj na slici 9. Opremljen je i privjeskom za učenje pomoću kojeg se izvršava on-line programiranje, što se odnosi na snimanje putanje i definiranje tehnoloških parametara za zavarivanje. Robot OTC Almega AX - V6 ima šest rotacijskih stupnjeva slobode gibanja na osnovi kojih je u pripadajućem radnom prostoru moguće postići precizno pozicioniranje i orijentiranje pištolja za zavarivanje. U sastavu robotske stanice nalazi se i izvor struje OTC Daihen DP 400 čije karakteristike su dane u tablici.



Slika 9. Robotska stanica za zavarivanje

Tablica 22. Karakteristike izvora struje OTC Daihen DP 400 [26]

Izvor struje		Daihen DP 400
Priključni napon, Hz		3 ~ 400 / 50
Interval struje zavarivanja, A		30 – 400
Interval napona zavarivanja, V		15,5 - 34
Intermitencija, A	100 %	283
	60 %	385
	50 %	400
Promjer žice za zavarivanje, mm		(0,8); 0,9; 1,0; 1,2; (1,4); (1,6)
Masa, kg		45
Dimenzije (DxŠxV), mm		250x544x640

Mjerenje međuprolazne temperature obavljeno je pomoću uređaja Fluke S68 prikazanog na slici 10.



Slika 10. Fluke S68 uređaj za mjerenje međuprolazne temperature

7.2. Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten u eksperimentu je visokočvrsti čelik API 5L X80. Oznaka je to prema API normi (eng. American Petroleum Institute) koja definira gradaciju čelika za izradu cjevovoda. Osnovna gradacija čelika za izradu cjevovoda koristi oznake A i B, no čelici s većim čvrstoćama nose oznaku X s pratećim brojem koji označava granicu razvlačenja izraženu u ksi (eng. kilopounds per square inch). Prema opisanoj metodologiji označavanja, čelik API 5L X80 ima granicu razvlačenja od 80 ksi što preračunato u SI jedinice iznosi 551 MPa. Mehanička svojstva i kemijski sastav osnovnog materijala dani su u tablicama 23 i 24. Prema normi HRN EN 10208-2:1996 utvrđena je oznaka čelika koja glasi L555MB.

Tablica 23. Mehanička svojstva čelika API 5L X80 [28][29]

Mehaničko svojstvo	Vlačna čvrstoća, MPa		Granica razvlačenja, MPa	
	Min.	Maks.	Min.	Maks.
X80	621	827	552	690
X80 (prema atestu)	650		557	

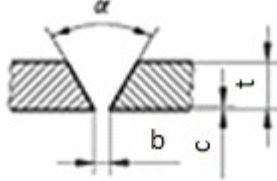

Tablica 24. Kemijski sastav čelika API 5L X80 prema certifikatu i ispitivanjima [29]

API 5L X80	Kemijski sastav (maseni udio), %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
Ispitivanje	0,07	0,35	1,94	0,015	0,00	0,15	0,01	0,001	0,01	0,027
Atest	0,065	0,33	1,97	0,015	0,0004	0,17	0,018	0,002	0,009	-
API 5L	0,24	-	1,4	0,025	0,015	-	-	-	-	-

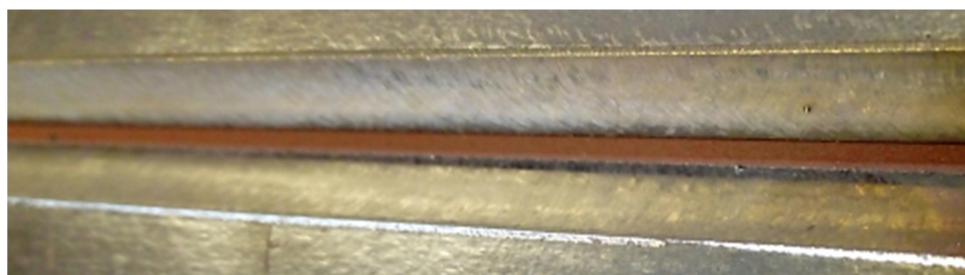
Prema normi CR ISO 15608 osnovni materijal spada u grupu 5, podgrupu 5.1. Predgrijavanje nije potrebno jer se proračunom prema Ito Bessyo metodi dobije 21 °C, što je sobna temperatura.

Priprema spoja provodi se prema normi ISO 9692, prikazano u tablici 25.

Tablica 25. Priprema spoja [30]

Debljina materijala t , mm	$3 < t \leq 10$
Tip pripreme	Jednostrana V priprema
Simbol (prema normi ISO 2553)	V
Poprečni presjek	
Kut α	60°
Razmak korijena b , mm	≤ 4
Debljina korijena c , mm	≤ 2
Preporučeno za postupke: (prema normi ISO 4063)	3, 111, 13, 141
Prikaz zavarenog spoja	
Opaska	Primjenjivo sa podloškom

Uzorci su pripremljeni strojnom obradom. Pripoji su napravljeni ručnim MAG postupkom zavarivanja. Keramičke su podloške pomoću aluminijske ljepljive trake zalijepljene s uže strane pripreme žlijeba. Priprema spoja uzorka prikazana je na slici 11.



Slika 11 Priprema spoja

7.3. Dodatni materijal

Dodatni materijal korišten za zavarivanje je MEGAFIL 741 B, (oznaka T 55 6 Mn1NiMo B M 3 H5 prema normi EN ISO 18276). To je bazičnim praškom punjena žica promjera 1,2 mm kojoj je potrebna dodatna zaštita plinom. Koristi se za zavarivanje sitnozrnatih čelika granice razvlačenja do 550 MPa i rezultira zavarenim spojevima s udarnim radom loma od 40 J na temperaturi - 40 °C. Mehanička svojstva dodatnog materijala prikazana su u tablici 26. Kemijski sastav dodatnog materijala dan je u tablici 27.

Tablica 26. Mehanička svojstva dodatnog materijala T 55 6 Mn1NiMo B M 3 H5 [31]

T 55 6 Mn1NiMo B M 3 H5	Mehanička svojstva				
	Granica razvlačenja,	Vlačna čvrstoća,	Istezljivost,	Udarni rad loma, J	
	MPa	MPa	%	- 40 °C	- 60 °C
	550	640 - 820	18	60	47

Tablica 27. Kemijski sastav dodatnog materijala T 55 6 Mn1NiMo B M 3 H5 [31]

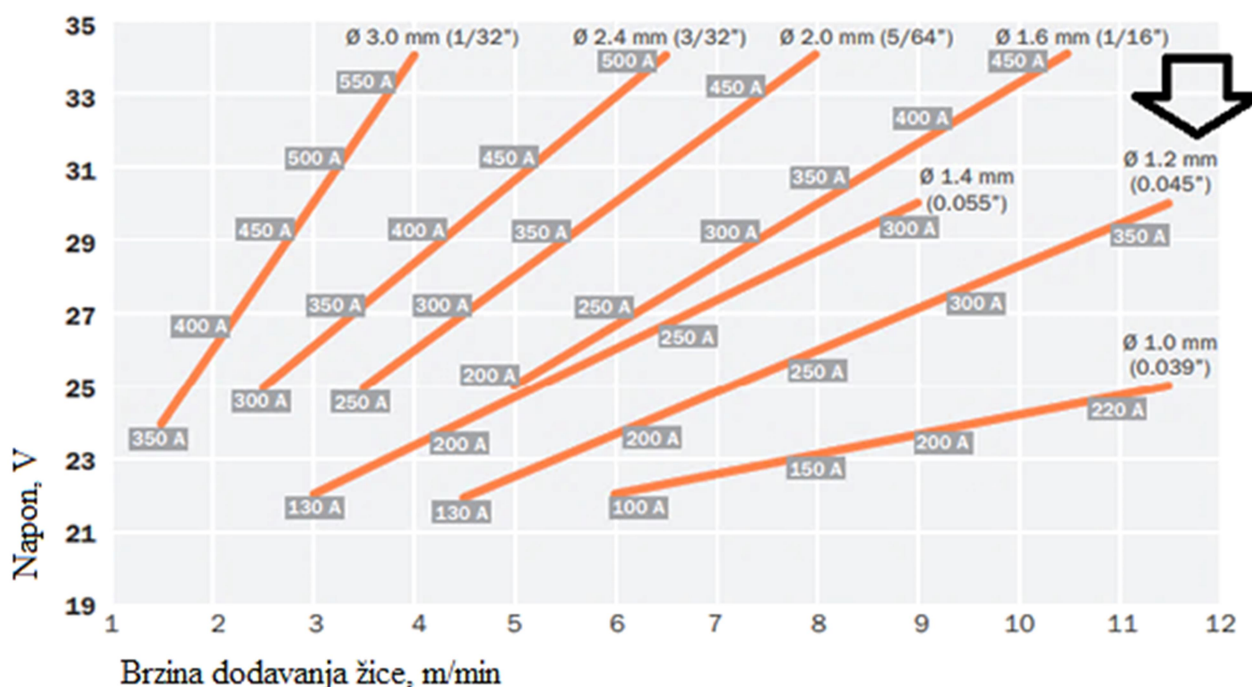
T 55 6 Mn1NiMo B M 3 H5	Kemijski sastav %							
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Mo	Cr
	0,05	1,4	0,4	0,015	0,015	1,0	< 0,35	-

7.4. Zaštitni plin

Kao zaštitni plin koristila se plinska mješavina sastava 82 % Ar + 18 % CO₂, (oznaka M21 prema normi HRN EN ISO 14175: 2008). Preporučeni protok plina od strane proizvođača dodatnog materijala je 12 - 18 l/min. Prilikom zavarivanja protok plina bio je 18 l/min. Korištena je zaštitna plinska mješavina proizvođača Messer trgovačkog imena Ferroline C 18.

7.5. Priprema za zavarivanje čelika API 5L X80

U zadatku je potrebno propisati tehnologiju zavarivanja čelika API 5L X80 bazičnim praškom punjenom žicom i odrediti optimalne unose topline. Slika 12 prikazuje interval parametara zavarivanja MEGAFIL punjenim žicama pod zaštitom plinske mješavine M21. Tijekom zavarivanja probnih uzoraka najstabilniji el. luk bio je kod struje zavarivanja od 300 A. Kod struje od 300 A prijenos dodatnog materijala odvijao se štrcajućim lukom. Prilikom zavarivanja probnih ploča također je definirana najmanja brzina zavarivanja od 20 cm/min i najveća brzina zavarivanja od 50 cm/min. Zavarivanje je provedeno i srednjom brzinom od 35 cm/min. Na taj su način definirana tri stanja pokusa na tri različite razine unosa topline.



Slika 12. Parametri zavarivanja MEGAFIL punjenim žicama [31]

Unos topline računa se prema formuli (2) [32]

$$Q = \eta \frac{U \cdot I}{v_z}, \text{ kJ/mm} \quad (2)$$

Gdje je:

Q – unesena toplina, kJ/mm; U – napon zavarivanja, V; I – jakost struje zavarivanja, A;

v_z – brzina zavarivanja, mm/s;

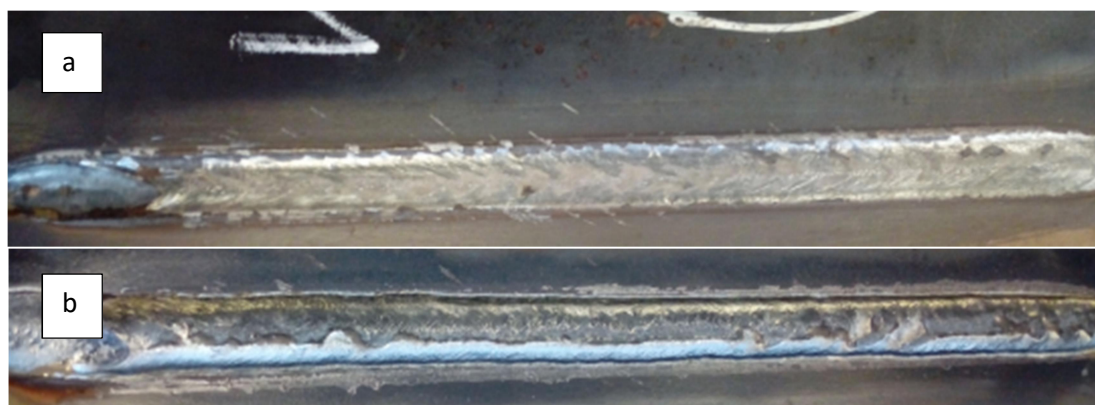
η – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja koji za FCAW postupak prema HRN EN 1011-1 iznosi 0,8

7.6. Zavarivanje čelika API 5L X80, broj stanja pokusa 1

Zavarivanje je provedeno na pločama debljine 350 x 100 x 10 mm. Priprema spoja izvršena je strojnom obradom. Pri zavarivanju brzinom od 20 cm/min, zavar je izveden u 2 prolaza bez njihanja. Parametri zavarivanja tijekom zavarivanja odstupali su od zadanih i prikazani su tablicom 28. Zavare nakon prvog i drugog prolaza prikazuje slika 13.

Tablica 28. Parametri zavarivanja za broj stanja pokusa 1

Br. stanja pokusa	Prolaz br.	Brzina zavarivanja, cm/min	Brzina dodavanja žice, m/min	Struja, A	Napon, V	Unos topline kJ/mm	Protok plina, l/min
1	Korijen	20	11,53	305	32,3	2,364	18
	2	20	10,54	290	32,1	2,243	18



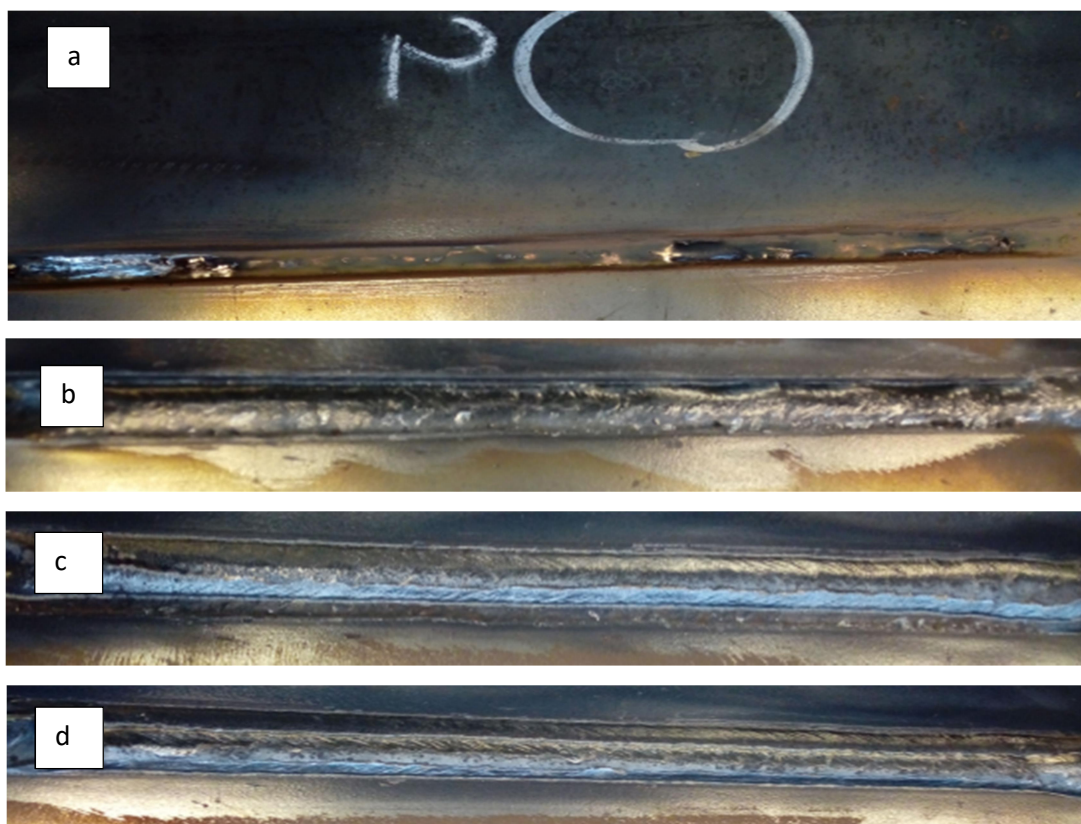
Slika 13. Zavari izvedeni brzinom 20 cm/min, a) korijen, b) drugi prolaz

7.7. Zavarivanje čelika API 5L X80, broj stanja pokusa 2

Kod zavarivanja brzinom 35 cm/min, zavarivanje je ostvareno u 4 prolaza bez njihanja. Struja zavarivanja postavljena je na 300 A, kao i kod zavarivanja brzinom 20 cm/min. Parametri zavarivanja tijekom zavarivanja odstupali su od zadanih i prikazani su tablicom 29. Izgled zavara nakon svakog prolaza prikazan je na slici 14.

Tablica 29. Parametri zavarivanja za broj stanja pokusa 2

Br. stanja pokusa	Prolaz br.	Brzina zavarivanja, cm/min	Brzina dodavanja žice, m/min	Struja, A	Napon, V	Unos topline, kJ/mm	Protok plina, l/min
2	Korijen	35	11,30	300	32	1,317	18
	2	35	11,86	310	32,7	1,390	18
	3	35	11,86	310	32	1,360	18
	4	35	12,53	320	32	1,404	18



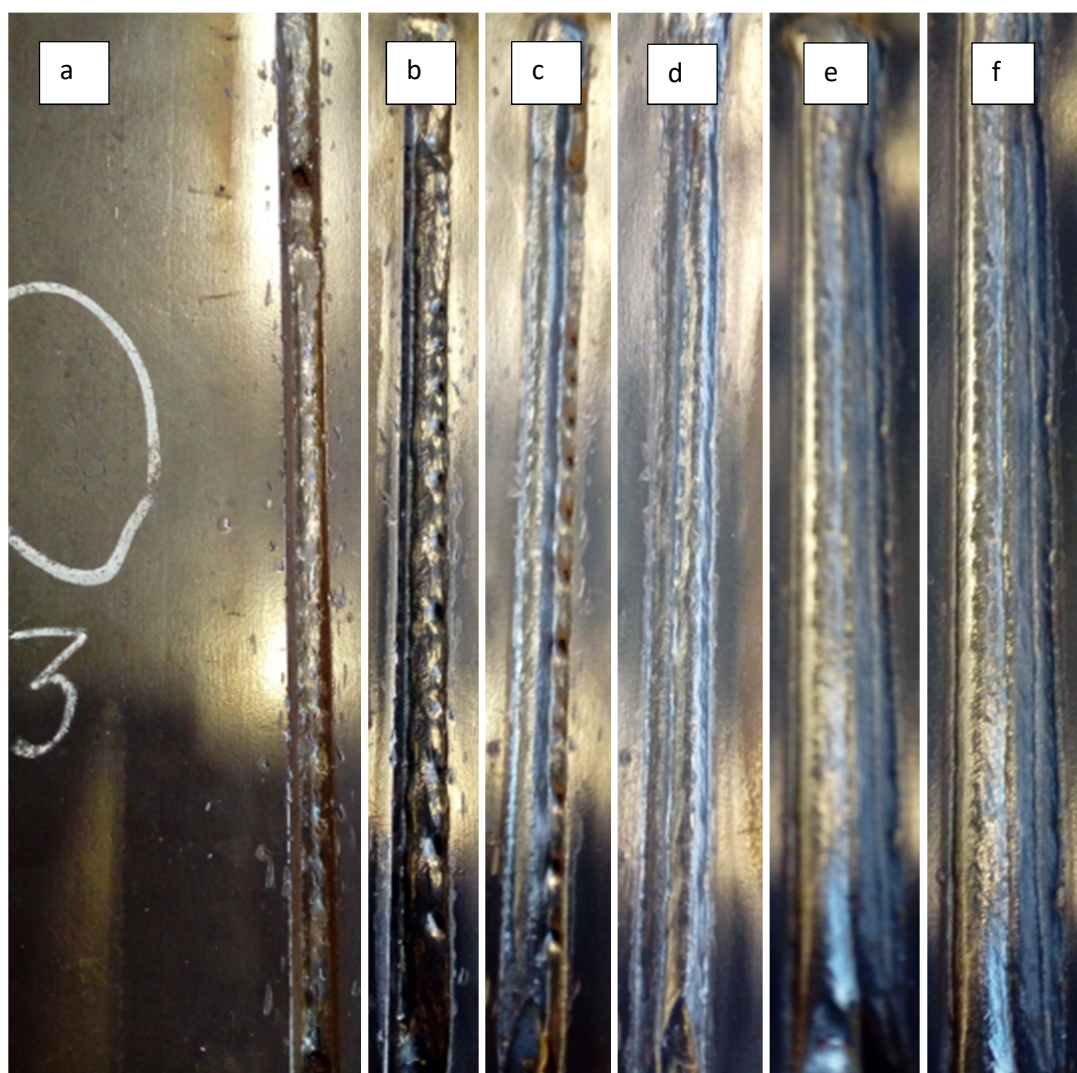
Slika 14. Zavari izvedeni brzinom 35 cm/min, a) korijen, b) drugi prolaz, c) treći prolaz, d) četvrti prolaz

7.8. Zavarivanje čelika API 5L X80, broj stanja pokusa 3

Kod zavarivanja brzinom 50 cm/min, zavar je izveden u 6 prolaza bez njihanja. Struja zavarivanja postavljena je na 300 A, kao i kod manjih brzina zavarivanja. Parametri su tijekom zavarivanja odstupali od zadanih i prikazani su tablicom 30. Zavari nakon svakog prolaza prikazani su slikom 15.

Tablica 30. Parametri zavarivanja za stanje pokusa 3

Br. stanja pokusa	Prolaz br.	Brzina zavarivanja, cm/min	Brzina dodavanja žice, m/min	Struja, A	Napon, V	Unos topline, kJ/mm	Protok plina, l/min
3	Korijen	50	11,53	305	32	0,937	18
	2	50	11,33	302	32,2	0,934	18
	3	50	13,18	330	32	1,013	18
	4	50	9,81	279	29,2	0,782	18
	5	50	12,85	325	32,5	1,014	18
	6	50	13,18	330	32,1	1,017	18



Slika 15. Zavari izvedeni brzinom 50 cm/min, a) korijen, b) drugi prolaz, c) treći prolaz, d) četvrti prolaz, e) peti prolaz, f) šesti prolaz

7.9. Analiza postupaka zavarivanja

Kod zavarivanja ploče 1 najvišim iznosom unosa topline električni luk bio je stabilan, zavari jednolični, a rubovi zavora potpuno staljeni. Drugi je prolaz rezultirao prevelikim nadvišenjem lica zavora. Nakon skidanja keramičke podloške bio je vidljiv nepotpun provar korijena.

Kod zavarivanja ploče 2 srednjim iznosom unosa topline električni luk je bio potpuno stabilan tijekom svih prolaza, a površine zavora jednolične. Korijen zavora je potpuno provaren, uz postojeći geometrijski diskontinuitet. Lice zavora ima preveliko nadvišenje.

Kod zavarivanja ploče 3 najnižim iznosom unosa topline električni luk je bio stabilan, korijenski prolaz kontinuiran, ali izrazito nepravilnog oblika. Talina korijenskog prolaza bila je previskozna i uz robove zavora ostale su velike pore, što je vidljivo na slici 15. Nepravilan oblik zavora za rezultat je imao jako teško i na mjestima nemoguće uklanjanje troske uz robove zavora. Električni luk je kod drugog prolaza zbog tih pora bio nestabilan. Površina zavora drugog prolaza također je nepravilna. Električni luk kod ostala 4 prolaza popune bio je potpuno stabilan, a izgled zavora popune jednolik s potpuno staljenim rubovima zavora. Lice zavora imalo je preveliko nadvišenje.

8. NERAZORNA ISPITIVANJA

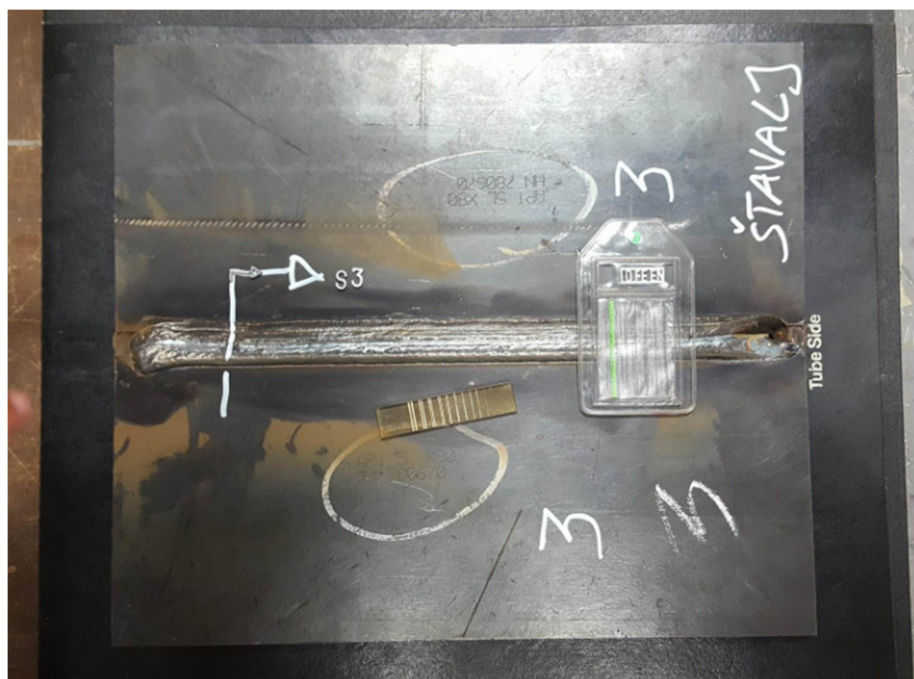
Uzorci su ispitivani vizualnom i rendgen metodom nerazornih ispitivanja. Za procjenu homogenosti zavarenih spojeva korišteni su radiogrami. Nakon zavarivanja, ploče su označene brojevima 1, 2 i 3. Ploča zavarivana najvišim unosom topline označena je brojem 1, ploča zavarivana srednjim iznosom unosa topline označena je brojem 2, a ploča zavarivana najnižim unosom topline označena je brojem 3. Tako označene ploče snimane su rendgen uređajem u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Ionizirajuća elektromagnetska zračenja x i gama koriste se za dobivanje slike na filmu (radiogramu) unutrašnjosti zavarenih spojeva odnosno proizvoda kako bi se otkrile eventualno prisutne pogreške zavarenih spojeva (poroznosti, uključci troske, ne provaren korijen, pukotine, ...). Radiografijom se dobro otkrivaju volumenske tj. trodimenzijske greške zavarenih spojeva, a teško se otkrivaju plošne greške. Samo pukotine koje su položene u smjeru zračenja daju indikacije na radiogramu. Pukotine okomite ili kose na smjer zračenja ne predstavljaju razlike debljine materijala i ne pokazuju se na filmu. Film se stavlja uz stjenku koja se prozračuje na suprotnoj strani od ulaza zračenja. Pri ocjeni radiograma, prije uočavanja indikacija – grešaka zavarenih spojeva provjerava se kvaliteta snimljenog filma. Na predmet se sa suprotne strane od filma, na stranu izvora zračenja stavlja žičani (različite debljine žica) ili stupnjevani indikator kvalitete slike. Propis određuje koja najtanja žica mora biti vidljiva na filmu, kako bi se i manje greške zavarenog spoja otkrile. [33]

Parametri snimanja rendgenom za sve su tri ploče bili jednaki i iznosili su:

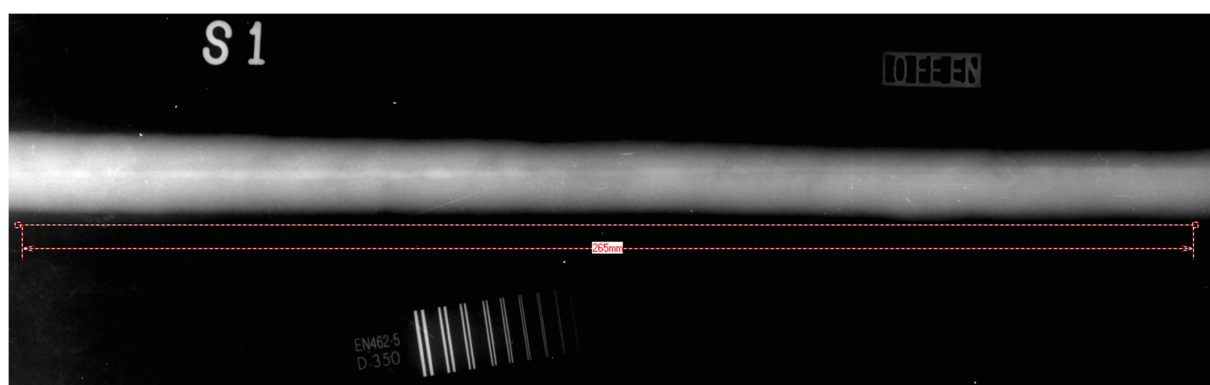
- napon, $U = 175 \text{ kV}$
- struja, $I = 4 \text{ mA}$
- vrijeme ekspozicije, $t = 2 \text{ min}, 15 \text{ s}$
- udaljenost film – fokus, $l = 700 \text{ mm}$.

Ploču, film, indikator kvalitete slike te oznake S3 i strelica koje su postavljene zbog prepoznavanja snimke i orijentacije ispod rendgenske cijevi prikazuje slika 16. Nakon snimanja filmovi su skenirani i pregledani pomoću programa „iSee“.

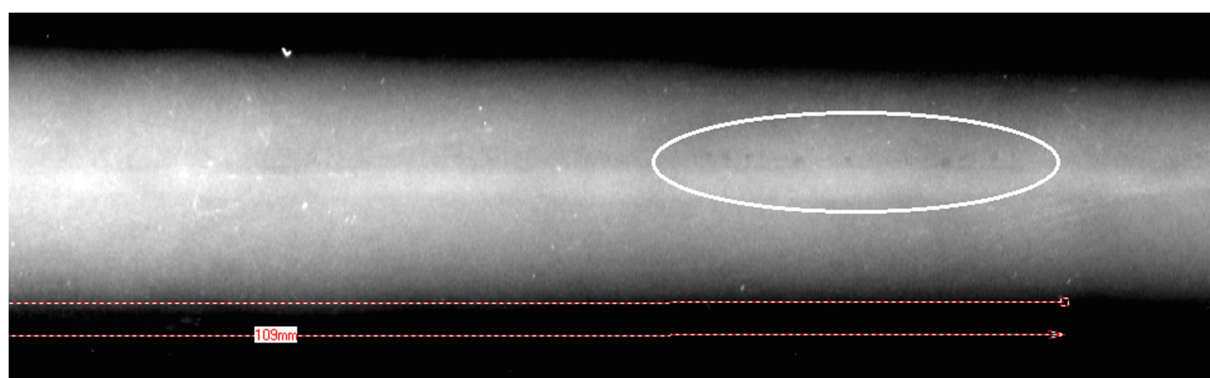


Slika 16. Ploča 3 na radiografskom snimanju

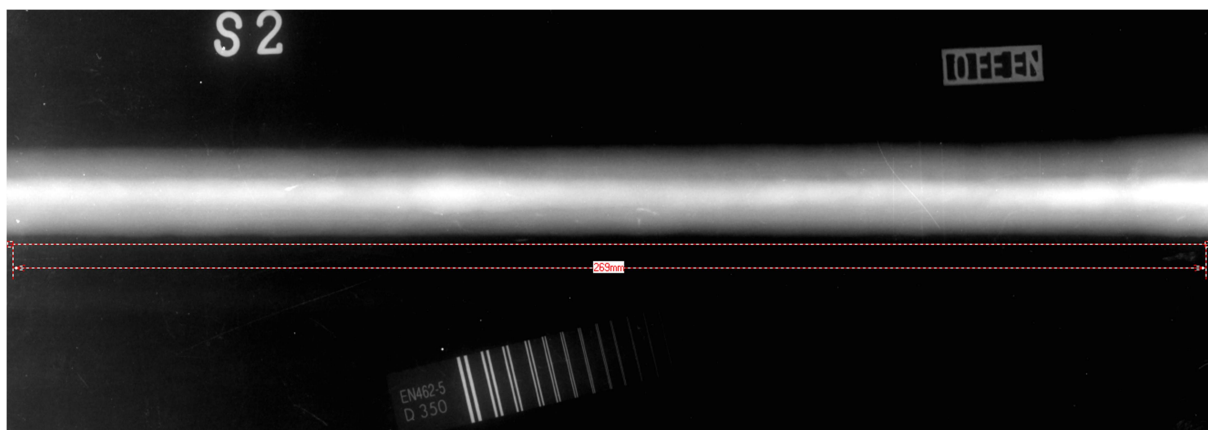
Na slikama 17 - 20 redom su prikazani radiogrami ploča 1, detalj radiograma ploče 1, zatim radiogrami ploča 2 i 3.



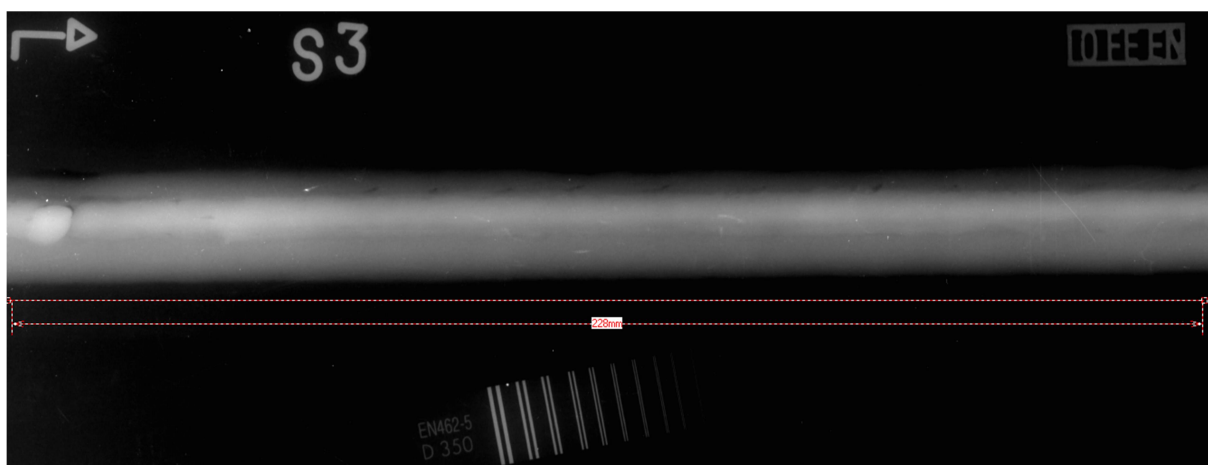
Slika 17. Radiogram ploče 1



Slika 18. Detalj radiograma ploče 1



Slika 19. Radiogram ploče 2



Slika 20. Radiogram ploče 3

8.1. Analiza nerazornih ispitivanja

Na radiogramu ploče 1 jasno je vidljiv neprovar korijena cijelom dužinom zavora. Neprovar korijena bio je vidljiv i bez rendgenske snimke. Na uvećanom radiogramu ploče 1 vidljive su pore u jednom dijelu zavora. Za izradu epruveta za ispitivanje udarnog rada loma korišten je homogen dio zavora. Na radiogramu ploče 2 nisu vidljive nikakve pogreške, odnosno zavar je ispravan. Provar korijena potpun je cijelom dužinom zavora. Na radiogramu ploče 3 jasno su vidljive pore uz, prema slici 20, gornji rub zavora koje su prisutne čitavom dužinom zavora. Iz tog razloga, mehaničko ispitivanje udarnog rada loma ovog zavora uopće nije provedeno. Provar korijena potpun je cijelom dužinom zavora.

Vizualnom metodom tijekom zavarivanja uočene su nepravilnosti pri zavarivanju korijenskog prolaza ploče 3, što je potvrđeno radiogramom. Također je nakon skidanja keramičke podloške uočen i neprovar korijena ploče 1. Ostalih pukotina ili ugorina nije bilo, troska je uklonjena nakon svakog prolaza pomoću čekića i žičane četke.

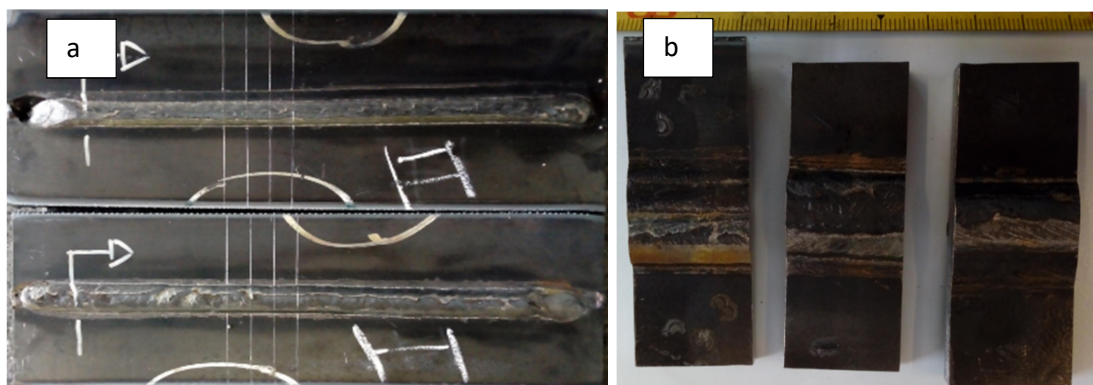
9. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA

Nakon nerazornih metoda ispitivanja slijede razorne metode ispitivanja mehaničkih svojstava. Od razornih metoda ispitivanja provedene su mjerenje tvrdoće Vickers metodom i ispitivanje udarnog rada loma Charpy batom. Od svakog je zavora napravljen po jedan makroizbrusak, a iz zavora 1 i 2 izrađene su po tri epruvete za ispitivanje udarnog rada loma. Ispitni su uzorci pripremljeni na način da su ploče prvo plinskim plamenom izrezane na manje komade širine 110 mm, što je prikazano slikom 21.



Slika 21. Rezanje ploča plinskim plamenom

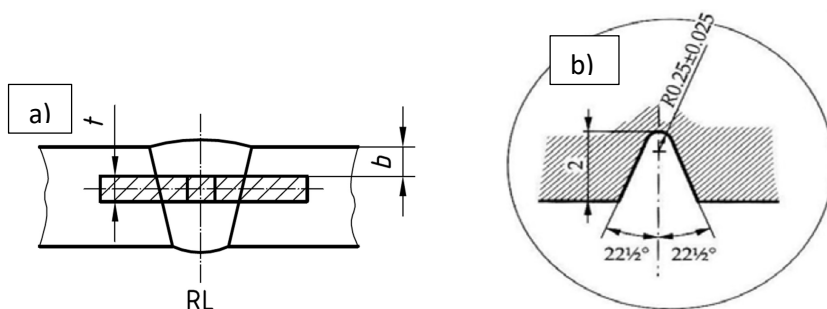
Nakon toga tračnom su pilom izrezivani uzorci za Charpy ispitivanje približnih dimenzija 13 x 10 x 110 mm. Iz ploča 1 i 2 izrezana su po tri uzorka. Mjesta s kojih su uzorci izrezivani označena su na slici 22 a). Zavar ploče 3 nije ispitivan Charpy batom iz razloga što je zavar nehomogen, što je vidljivo na slici 20. Tračnom pilom su poprečno na zavar izrezani komadi dimenzija 30 x 10 x 110 mm, iz kojih su izrađeni makroizbrusci sve tri ploče.



Slika 22. a) položaj Charpy epruveta na uzorcima 1 i 2, b) priprema makroizbrusaka

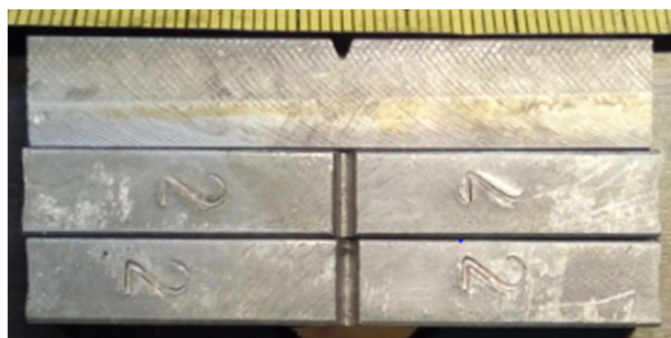
9.1. Ispitivanje udarnog rada loma

Uzorci su strojno obrađeni glodanjem na dimenzije 7,5 x 10 x 110. Nakon strojne obrade uzorci su nagrizani nitalom, kako bi odredili mjesto na kojem se nalazi zavar te označili položaj i orijentaciju usjeka i ukupnu dužinu epruvete. Nital je otopina 97 % etanola i 3 % dušične kiseline (HNO_3). Usjek epruvete postavljen je okomito na uzdužnu os zavora, odnosno u ravninu poprečnog presjeka prema normi EN ISO 9016, prikazano na slici 23 a). Usjek je postavljen na metal zavora.



Slika 23. a) Položaj i orijentacija epruvete, b) Usjek epruvete [34]

Strojnomo obradom su uzorci dodatno obrađeni na dimenzije prema slici, $t = 7,5$; $b = 2,5$; duljina uzorka $l = 55$ mm. Također glodanjem je napravljen V usjek na epruveti prema slici 23 b). Tako pripremljene epruvete prikazane slikom 24 ispitivane su na Charpy batu u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

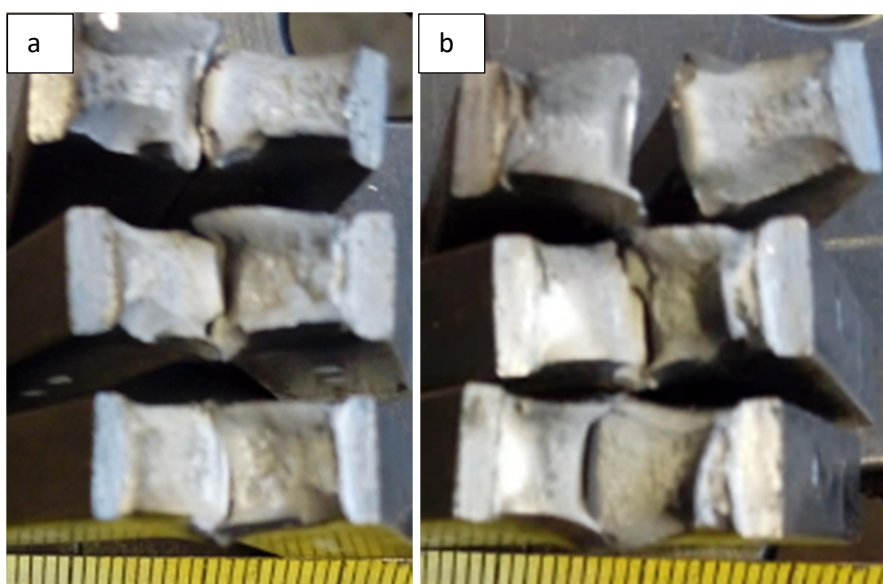


Slika 24. Charpy epruvete

Rezultati ispitivanja udarnog rada loma na Charpy batu prikazani su tablicom 31. Prijelomne površine epruveta uzorka 1 prikazane su slikom 25 a), a uzorka 2 slikom 25 b).

Tablica 31. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Uzorak	Epruveta br:	Temperatura, °C	Udarni rad loma, J
1	1	20	95
	2	20	105
	3	20	112
2	1	20	128
	2	20	132
	3	20	132



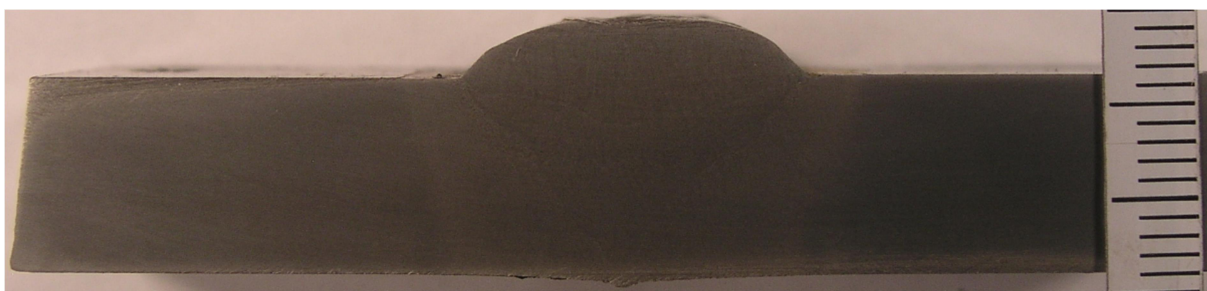
Slika 25. a) prijelomna površina uzorka 1, b) prijelomna površina uzorka 2

9.2. Analiza rezultata ispitivanja udarnog rada loma

Iz rezultata ispitivanja udarnog rada loma prikazanih u tablici 31 vidljivo je da zavar izveden srednjim iznosom unosa topline ima veći udarni rad loma. Iz slike 25 vidljivo je da je prijelom svih šest ispitivanih epruveta duktilan.

9.3. Ispitivanje makroizbrusaka

Nakon izrezivanja tračnom pilom makroizbrusci su ručno brušeni brusnim papirima granulacije 80, 100, 180 i 360, zatim strojno brušeni brusnim papirima granulacije 500, 1000 i 2000. Tako pripremljeni uzorci nagrizani su nitalom. Makroizbrusci su prikazani na slikama 26, 27 i 28 redom zavora 1, 2 i 3.



Slika 26. Makroizbrusak 1



Slika 27. Makroizbrusak 2



Slika 28. Makroizbrusak 3

Korištenjem programa „ImageJ“ izmjereni su nadvišenje i širina lica zavora te nadvišenje i širina korijena zavora. Program mjeri duljine na način da se kalibrira pomoću neke poznate dužine sa slike i iz te dužine izračuna duljinu piksela na osnovu čega dalje mjeri bilo koju dužinu sa slike. Izmjerene su vrijednosti prikazane tablicom 32.

Tablica 32. Dimenzije zavarenih spojeva

Ploča	lice zavara		korijen zavara	
	Nadvišenje, mm	Širina, mm	Nadvišenje, mm	Širina, mm
1	3	17,5	0,5	1,8
2	3,5	20,3	1,7	8
3	3	21,9	1,6	7,3

9.4. Analiza makroizbrusaka

Na makroizbruscima golim okom jasno je vidljiva zona utjecaja topline i prolazi. Zona utjecaja topline s obzirom na unose topline očekivano je najveća na uzorku 1 odnosno najmanja na uzorku 3. Na slikama 26, 27 i 28 je potrebno obratiti pažnju i na deformacije ploča, koje su najveće na uzorku 3 unatoč tome što su ploče prilikom zavarivanja bile čvrsto pritegnute za radni stol. Iz tablice 32 je vidljivo da je najveće nadvišenje i širina korijena i lica zavara ploče 2, a najmanje kod zavara ploče 1.

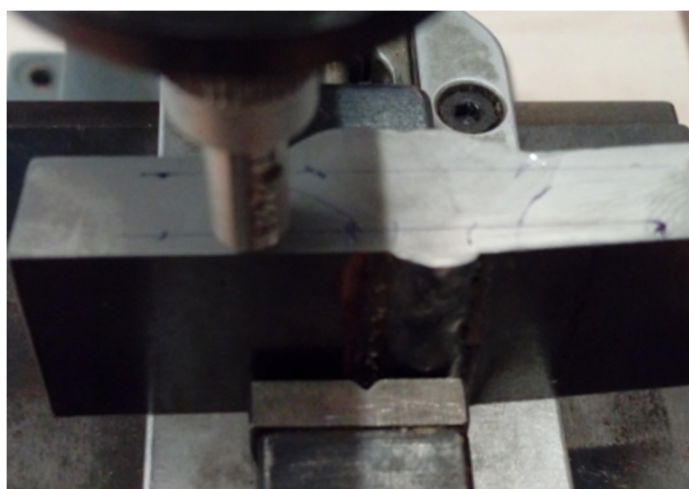
9.5. Mjerenje tvrdoće Vickers metodom

Indentor za mjerenje tvrdoće Vickers metodom je četverostrana piramida s kutom između stranica od 136°. Primjenom ovakve geometrije penetratora dobivaju se vrijednosti tvrdoće neovisne o primijenjenoj sili pa se tvrdoća mekih i tvrdih materijala može mjeriti primjenom iste sile, a isto tako se tvrdoća istog materijala može mjeriti s različitim opterećenjima. Pomoću mjernog mikroskopa mjeri se dijagonala baze otisnuća (kvadrata), površina otisnuća izražava se pomoću dijagonale "d", a tvrdoća „HV“ se računa prema izrazu (3), ali češće se koriste već gotove tablice. [35]

$$HV = \frac{F \cdot 0,189}{d^2} \quad (3)$$

Vickersova tvrdoća je bezdimenzionalna veličina, a uz iznos tvrdoće navodi se i sila opterećivanja (npr. HV10 = 430), što znači da je izmjerena tvrdoća iznosila 430 i da je dobivena utiskivanjem indentora silom od 10*9,81 N u trajanju od 10 - 15 s. [35]

Tvrdoća je mjerena na način da su na uzorcima označene dvije linije dva mm udaljene od gornje i donje površine ploče prema kojima su se obavljala mjerenja. Mjerenja su obavljana na način da su tri mjerenja izmjerena u osnovnom materijalu, zatim dva mjerenja u zoni utjecaja topline, jedno mjerenje na liniji staljivanja, tri mjerenja na metalu zavara, zatim ponovno jedno mjerenje na liniji staljivanja, dva u zoni utjecaja topline i tri u osnovnom materijalu. Ovaj je postupak na svakom uzorku ponovljen na obje označene linije vidljive na slici 29.



Slika 29. Mjerenje tvrdoće

Rezultati mjerenja prikazani su tablicama 33, 34 i 35. Prema tablicama OM označava osnovni materijal, ZUT označava zonu utjecaja topline, LS označava liniju staljivanja, MZ označava metal zavora, a L1 i L2 duljine dijagonala otiska indentora.

Tablica 33. Izmjerene vrijednosti tvrdoće ploče 1

BR. MJERENJA	UZORAK 1	(L1+L2)/2	HV 10
1	OM	0,297	210
2	OM	0,301	205
3	OM	0,297	210
4	ZUT	0,315	187
5	ZUT	0,305	199
6	LS	0,319	182
7	MZ	0,298	209
8	MZ	0,296	212
9	MZ	0,295	213
10	LS	0,314	188
11	ZUT	0,302	203
12	ZUT	0,313	189
13	OM	0,309	194
14	OM	0,302	203
15	OM	0,301	205
16	OM	0,303	202
17	OM	0,310	193
18	OM	0,307	197
19	ZUT	0,317	185
20	ZUT	0,318	183
21	LS	0,305	199
22	MZ	0,307	197
23	MZ	0,303	202
24	MZ	0,301	205
25	LS	0,299	207
26	ZUT	0,310	193
27	ZUT	0,300	206
28	OM	0,294	215
29	OM	0,291	219
30	OM	0,297	210

Tablica 34. Izmjerene vrijednosti tvrdoće ploče 2

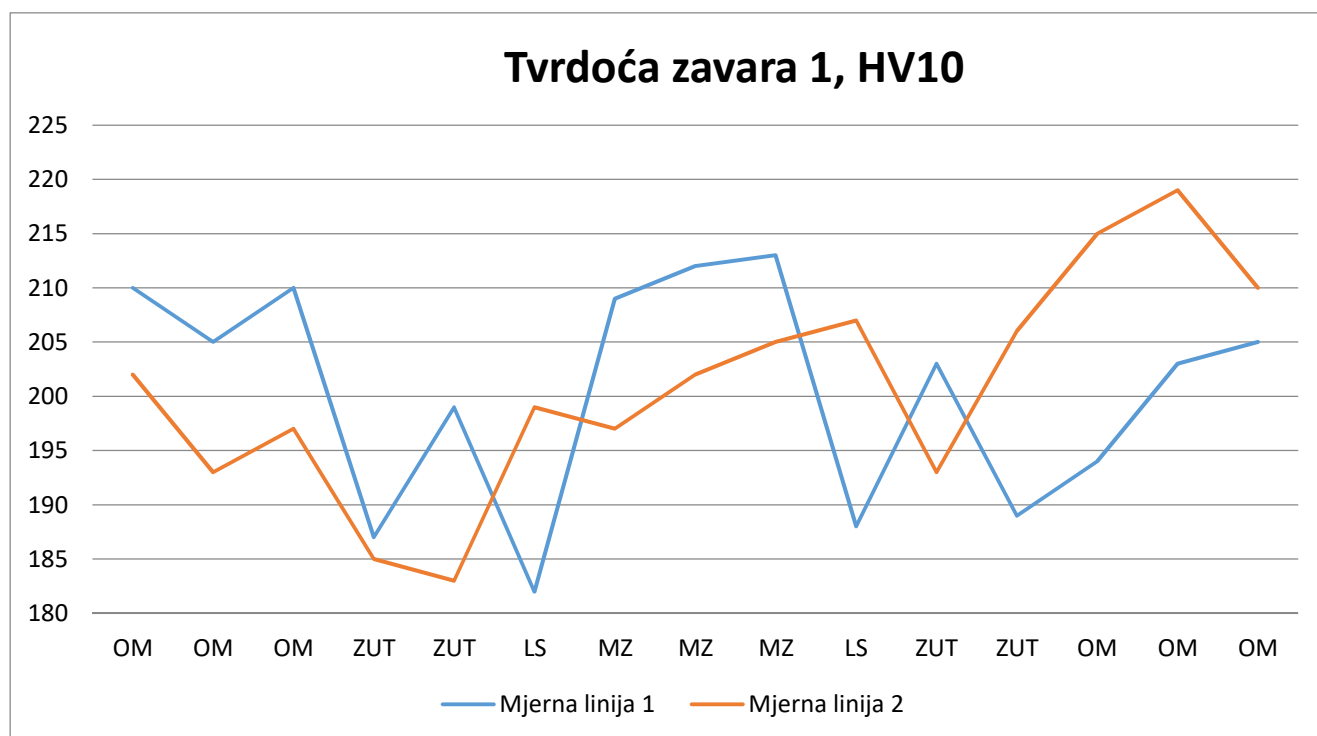
BR. MJERENJA	UZORAK 2	(L1+L2)/2	HV 10
1	OM	0,295	213
2	OM	0,294	215
3	OM	0,300	206
4	ZUT	0,297	210
5	ZUT	0,297	210
6	LS	0,282	233
7	MZ	0,298	209
8	MZ	0,294	215
9	MZ	0,295	213
10	LS	0,297	210
11	ZUT	0,293	216
12	ZUT	0,315	187
13	OM	0,286	227
14	OM	0,281	235
15	OM	0,284	230
16	OM	0,283	232
17	OM	0,285	228
18	OM	0,291	219
19	ZUT	0,293	216
20	ZUT	0,294	215
21	LS	0,287	225
22	MZ	0,291	219
23	MZ	0,296	212
24	MZ	0,287	225
25	LS	0,292	218
26	ZUT	0,294	215
27	ZUT	0,296	212
28	OM	0,299	207
29	OM	0,287	225
30	OM	0,293	216

Tablica 35. Izmjerene vrijednosti tvrdoće ploče 3

BR. MJERENJA	UZORAK 2	(L1+L2)/2	HV 10
1	OM	0,287	225
2	OM	0,288	224
3	OM	0,292	218
4	ZUT	0,304	201
5	ZUT	0,298	209
6	LS	0,292	218
7	MZ	0,295	213
8	MZ	0,292	218
9	MZ	0,293	216
10	LS	0,282	233
11	ZUT	0,287	225
12	ZUT	0,299	207
13	OM	0,297	210
14	OM	0,298	209
15	OM	0,300	206
16	OM	0,290	221
17	OM	0,303	202
18	OM	0,294	215
19	ZUT	0,316	186
20	ZUT	0,306	198
21	LS	0,293	216
22	MZ	0,291	219
23	MZ	0,290	221
24	MZ	0,298	209
25	LS	0,303	202
26	ZUT	0,304	201
27	ZUT	0,294	215
28	OM	0,298	209
29	OM	0,302	203
30	OM	0,297	210

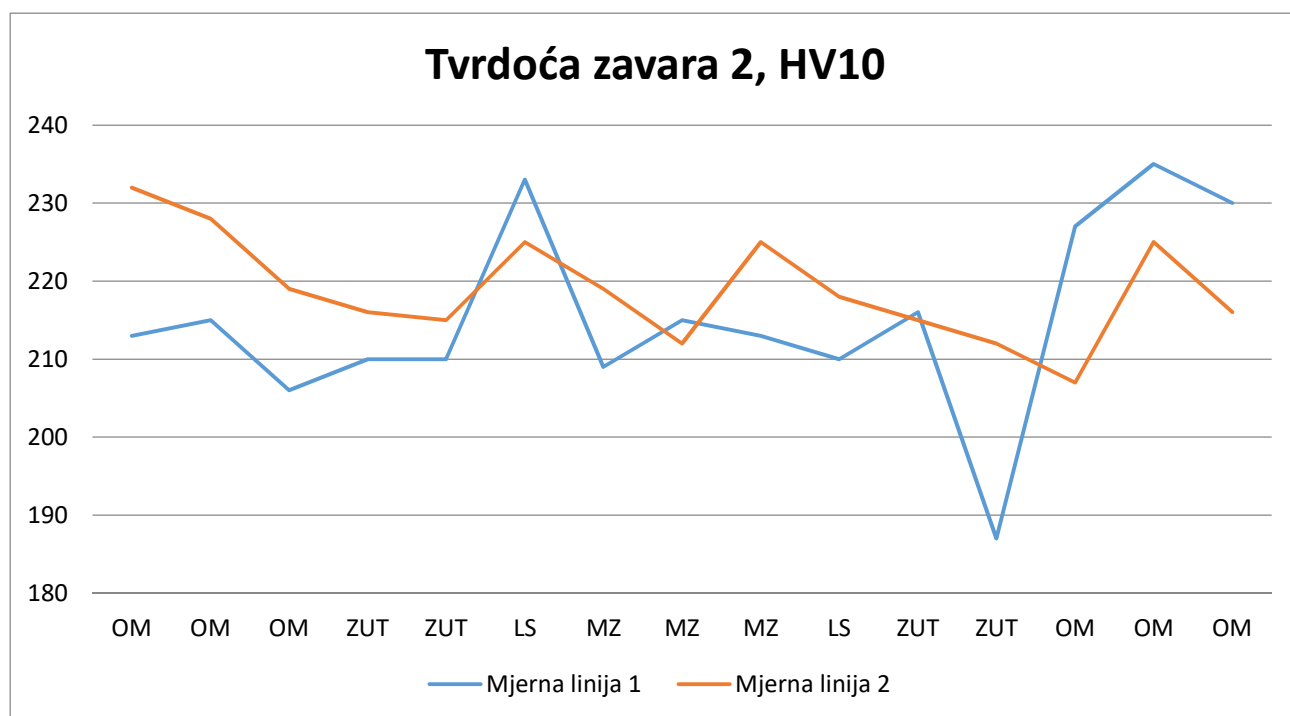
9.6. Analiza mjerenja tvrdoće zavora

Na slikama 31, 32 i 33 su grafički prikazane vrijednosti tvrdoće makroizbrusaka. Mjerna linija 1 označava područje mjerenja zoni lica zavora, a mjerna linija 2 označava područje mjerenja u zoni korijena zavora prema slici 29. OM označava osnovni materijal, ZUT označava zonu utjecaja topline, LS označava liniju staljivanja, MZ označava metal zavora.



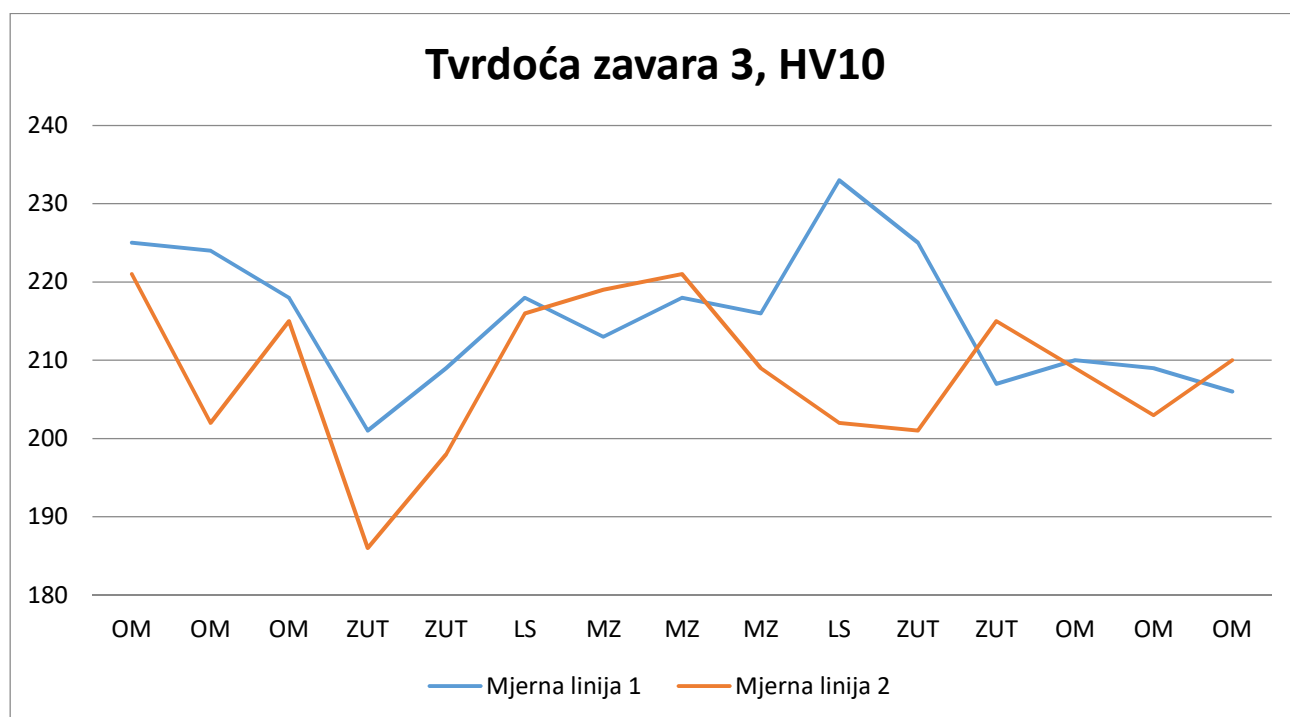
Slika 30. Grafički prikaz tvrdoće zavora 1

Iz grafičkog prikaza tvrdoće zavora 1 vidljivo je da nema izraženih razlika tvrdoće mjerene po mjerenoj liniji 1 i mjerenoj liniji 2. Tvrdoća osnovnog materijala je unutar intervala 193 HV10 do 219 HV10. Tvrdoća u zoni utjecaja topline zavora 1 kreće se u rasponu od 182 HV10 do 203 HV10. Tvrdoća metala zavora 1 je u intervalu 197 HV10 do 213 HV10. Također može se primijetiti da je tvrdoća metala zavora 1 mjerena po liniji 1 nešto viša od tvrdoće mjerene po liniji 2.



Slika 31. Grafički prikaz tvrdoće zavar 2

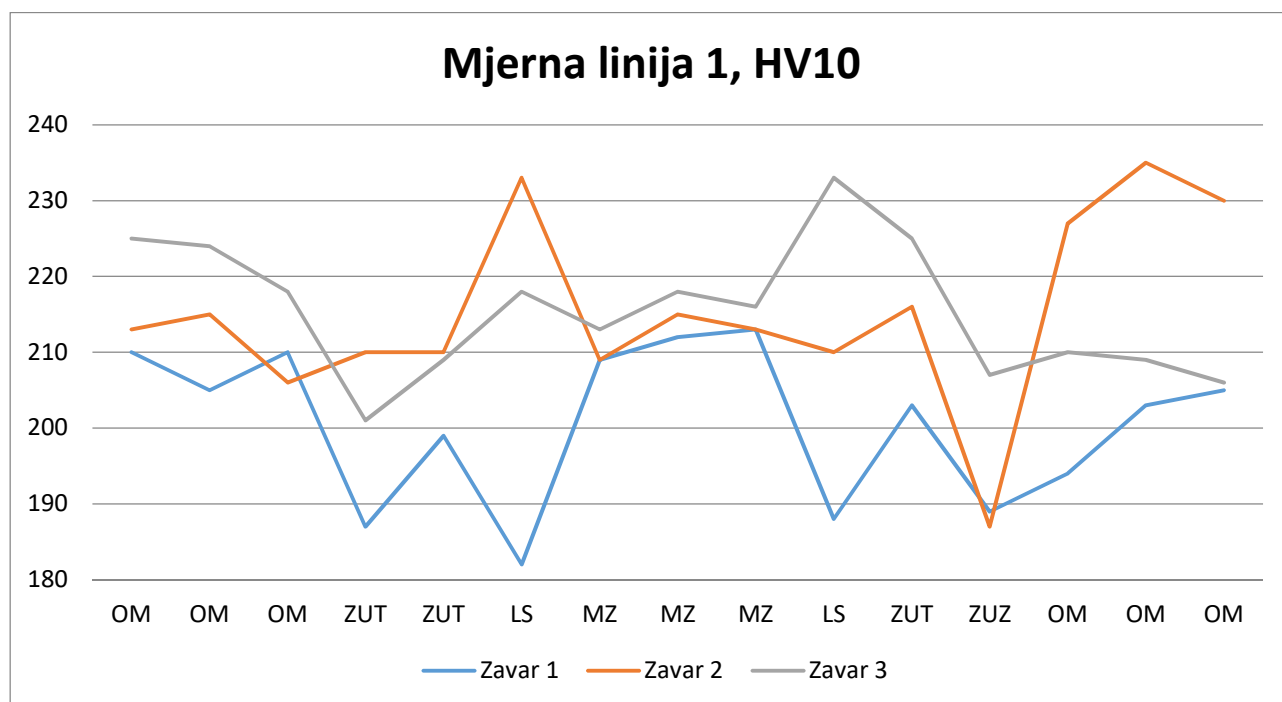
Iz grafičkog prikaza tvrdoće zavar 2 vidljivo je da nema značajne razlike u tvrdoćama na mjernoj liniji 1 u odnosu na tvrdoće na mjernoj liniji 2. Interval tvrdoće osnovnog materijala je 206 HV10 do 235 HV10. Interval tvrdoće zone utjecaja topline zavar 2 je 187 HV10 do 233HV10. Interval tvrdoće metala zavar 2 je 209 HV10 do 225 HV10.



Slika 32. Grafički prikaz tvrdoće zavar 3

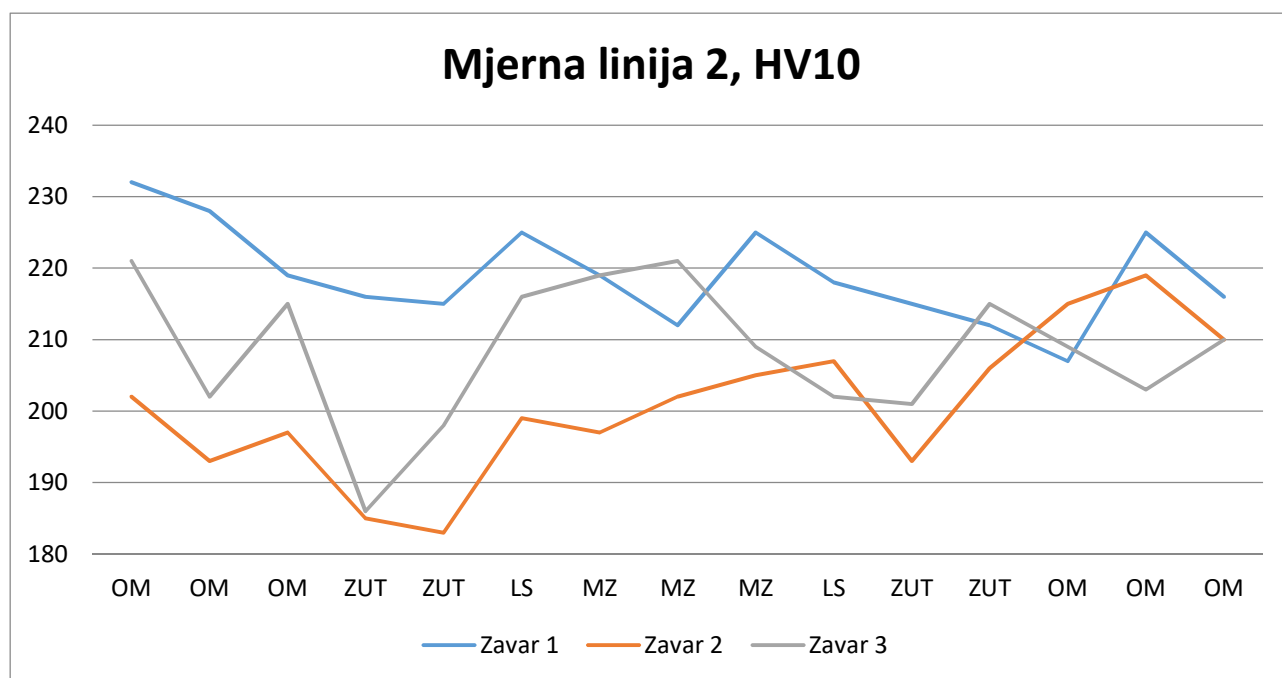
Iz grafičkog prikaza tvrdoće zavar 3 vidljivo je da nema značajnih razlika u tvrdoćama na linijama 1 i 2. Tvrdoća osnovnog materijala je u intervalu 202 HV10 do 225 HV10. Tvrdoća u zoni utjecaja topline zavar 3 je u intervalu 186 HV10 do 233 HV10. Tvrdoća metala zavar 3 je u intervalu 209 HV10 do 221 HV10. Također iz grafa je vidljivo da je tvrdoća u zoni utjecaja topline zavar 3 veća na mjernoj liniji 1 u odnosu na tvrdoću mjerenu na mjernoj liniji 2.

Na slikama 33 i 34 usporedno su prikazane vrijednosti tvrdoća zavar 1, 2 i 3 mjerene u zoni lica zavar (mjerna linija 1) i u zoni korijena zavar (mjerna linija 2).



Slika 33. Usporedni prikaz tvrdoća na mjernoj liniji 1

Na grafu koji usporedno prikazuje tvrdoće sva tri zavar mjerene po mjernoj liniji 1 vidljivo je da je u zoni utjecaja topline najniža tvrdoća zavar 1. Tvrdoće metala zavar mjerene prema mjernoj liniji 1 neznatno se razlikuju.

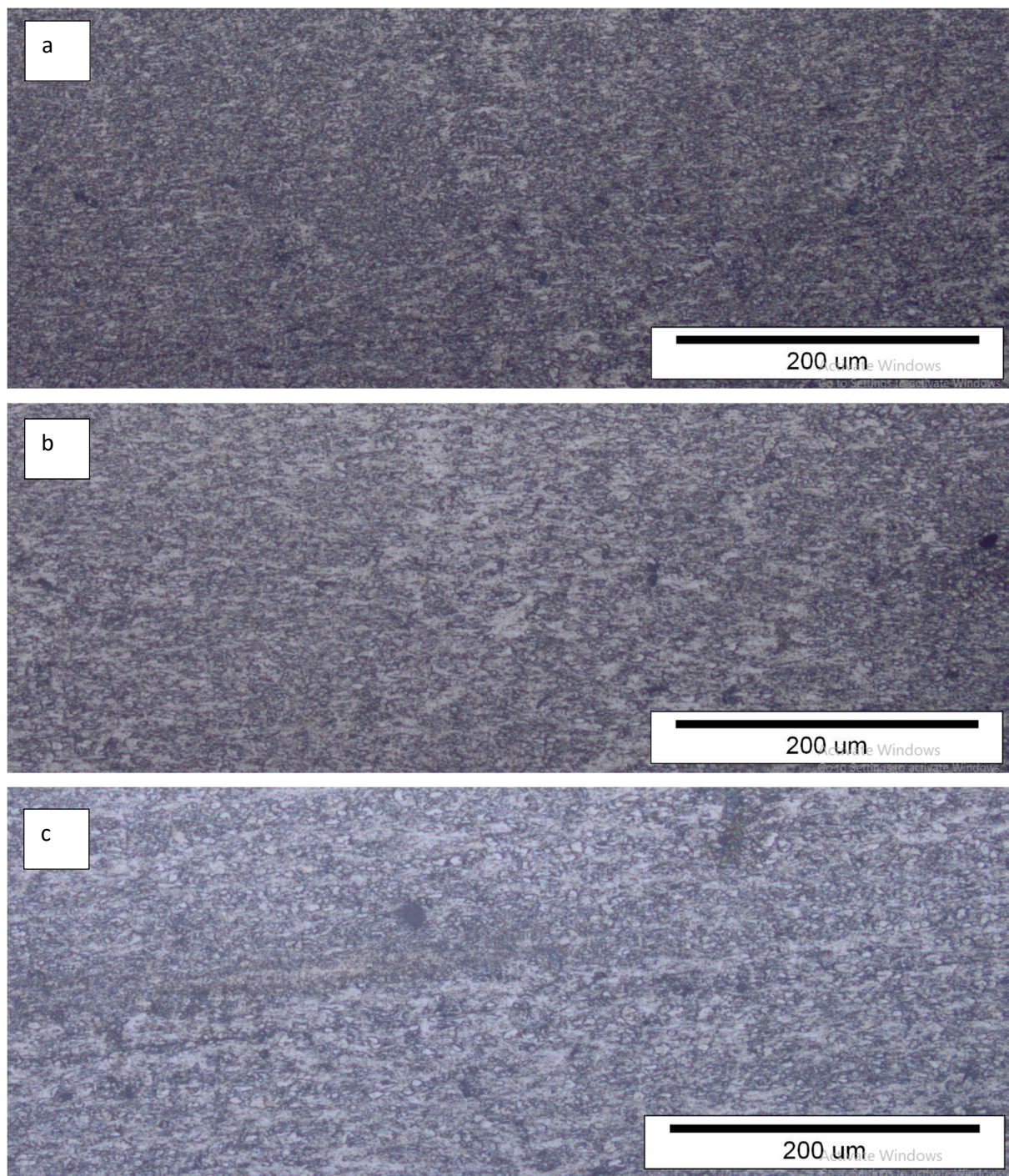


Slika 34. Usporedni prikaz tvrdoća na mjernoj liniji 2

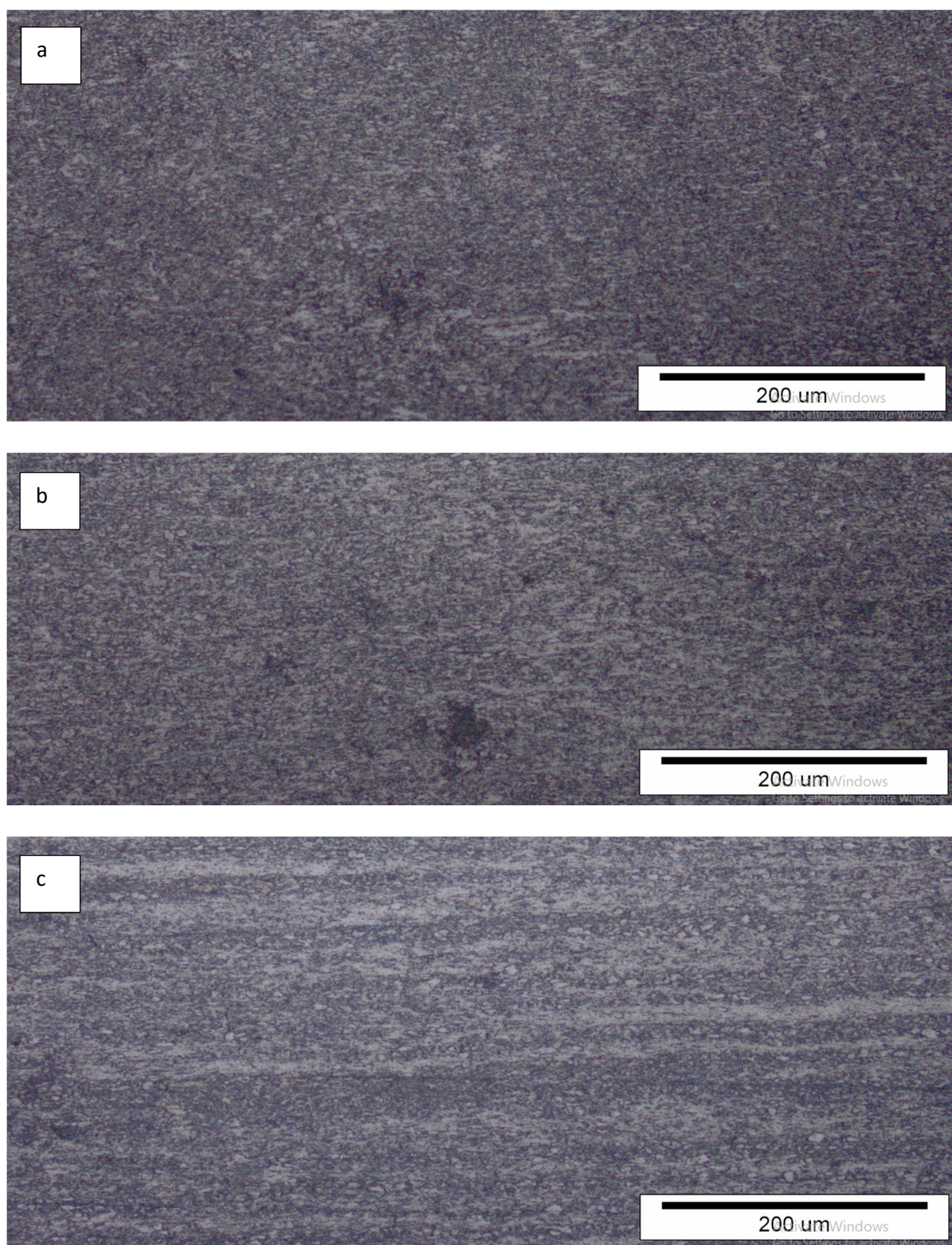
Iz grafa usporednih prikaza tvrdoća zavora 1, 2 i 3 mjerenih na mjernoj liniji 2 vidljivo je da nema izraženih razlika u tvrdoći metala zavora ni zona utjecaja topline. Ipak sumarno najnižu tvrdoću ima zavar 2. Prema zonama utjecaja topline najviša je tvrdoća zavora 1.

9.7. Analiza mikrostrukture

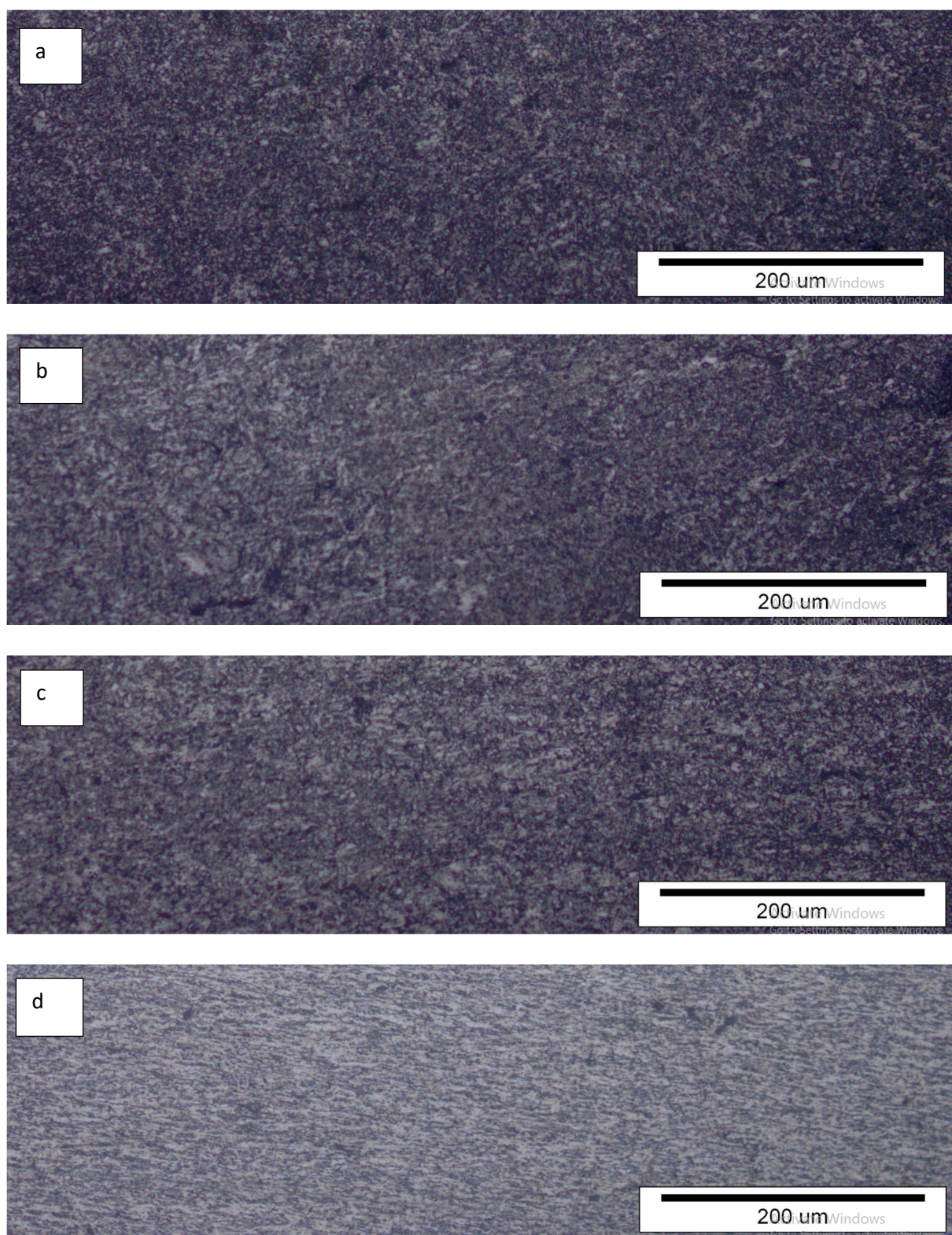
Mikrostruktura makroizbrusaka snimana je elektronskim mikroskopom uz povećanje 200 puta. Mikrostrukture zavar, linije staljivanja i zone utjecaja topline, sve tri ploče prikazane su slikama 35, 36 i 37. Mikrostruktura osnovnog materijala ista je kod sve tri ploče i prikazana je na slici 37 d).



Slika 35. Mikrostruktura ploče 1, a) zavar, b) linija staljivanja, c) zut



Slika 36. Mikrostruktura ploče 2, a) zavar, b) linija staljivanja, c) zut



Slika 37. Mikrostruktura ploče 3, a) zavar, b) linija staljivanja, c) žut, d) osnovni materijal

Na slikama je jasno vidljiva sitnozrnata feritno perlitna mikrostruktura niskolegiranog čelika visoke čvrstoće. U odnosu na mikrostrukturu osnovnog materijala vidljivo je pogrubljenje zrna u zoni utjecaja topline sva tri zavarena spoja.

Usporedbom mikrostrukture zavara 1 sa mikrostrukturom osnovnog materijala vidljivo je da je veličina mikrostrukturnih zrna približno jednaka, dok su mikrostrukturna zrna u zoni utjecaja topline nešto povećana. Također, vidljiv je povećan udio ferita u mikrostrukтури zone utjecaja topline.

Veličina mikrostrukturnih zrna zavara 2 manja je u usporedbi s veličinom mikrostrukturnih zrna osnovnog materijala. U zoni utjecaja topline nešto su povećana mikrostrukturna zrna u odnosu na veličinu mikrostrukturnih zrna zavara i osnovnog materijala. Također je vidljiv povećan udio ferita u mikrostrukтури zone utjecaja topline zavara 2.

Iz mikrostrukture zavara 3 vidljivo je da zavar sadržava povećan udio perlita u odnosu na mikrostrukturu osnovnog materijala. Vidljivo je pogrubljenje zrna u zoni utjecaja topline. Općenito zavar 3 ima najgrublju mikrostrukturu. Usporedbom veličina mikrostrukturnih zrna u zonama utjecaja topline može se zaključiti da je najgrublja mikrostruktura u zoni utjecaja topline zavara 3.

10. PROCJENA OPERATIVNIH KARAKTERISTIKA KORIŠTENOG DODATNOG MATERIJALA

Bazičnim praškom punjena žica T 55 6 Mn1NiMo B M 3 H5 potpuno je odgovarajuća za zavarivanje čelika API 5L X80. Ova je tvrdnja temeljena na rezultatima provedenog eksperimenta. Ispitivana su mehanička svojstva tvrdoća i udarni rad loma. Rezultati mjerenja tvrdoće ukazuju da je tvrdoća jednolika po presjeku sva tri zavora. Udarni rad loma iznosi 130 J pri 20 °C. Na prijelomnim površinama uzoraka ispitivanih na Charpy batu jasno je vidljiv duktilni lom. To znači da zavori izvedeni ovim dodatnim materijalom nisu osjetljivi na krhki lom, što je svojstvo visokočvrstih čelika. Pregledom rendgenskih snimaka može se zaključiti da je pri zavarivanju adekvatnim parametrima zavarivanja zavar izveden ovim dodatnim materijalom u potpunosti homogene strukture.

Dodatni materijal zahtjeva dodatnu zaštitu plinom što otežava primjenu za zavarivanje na terenu. Dodatni materijal zahtjeva precizno podešavanje parametara zavarivanja. Kao nedostatak operativnih karakteristika svakako je i otežano uklanjanje bazične troske.

11. ZAKLJUČAK

FCAW postupak zavarivanja kao inačica MAG postupka zavarivanja sve se više primjenjuje za zavarivanje čelika i njegovih legura iako primjenu pronalazi i za zavarivanje drugih metala i njihovih legura. S obzirom na prednosti koje ovaj postupak ima u odnosu na MAG zavarivanje izuzetno je pogodan za zavarivanje debljih metala. Posebno treba istaknuti fleksibilnost kod pripreme zavarenog spoja i mogućnost zavarivanja bez dodatne zaštite plinom što ga čini prvim izborom za zavarivanje u brodogradilištima. Neke praškom punjene žice zbog sastava praška unutar jezgre imaju dobra svojstva kod zavarivanja vertikalno prema dolje, što ih čini pogodnima za zavarivanje cjevovoda na terenu. Praškom punjene žice skuplje su od punih žica za zavarivanje. Kod žica za zavarivanje različitih legiranih čelika zbog jednostavnog dodavanja legiranih elemenata u jezgru žice troškovi su ipak smanjeni u odnosu na zavarivanje punim žicama. Troska kod FCAW postupka zavarivanja pomaže zadržavanje taline u prisilnim položajima zavarivanja. Ovim se postupkom ostvaruju zavareni spojevi izuzetnih mehaničkih svojstava što omogućuje primjenu za zavarivanje čelika visoke čvrstoće. Metalom punjene žice izvrsne su kod primjene za automatizirano i robotizirano zavarivanje zato što nema potrebe za čišćenjem troske između prolaza.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je robotizirano zavarivanje čelika API 5L X80 bazičnim praškom punjenom žicom na tri razine unosa topline. Električni luk je pri zavarivanju ploča 1 i 2 bio potpuno stabilan tijekom svih prolaza. Kod zavarivanja ploče 3, električni luk je imao određene nestabilnosti što je rezultat prevelike brzine zavarivanja i nepravilne površine prva dva prolaza.

Iz radiograma ploče 1 može se zaključiti da zavar nije u potpunosti homogen zbog prisutnosti pora u određenom dijelu, ali u većem je dijelu homogene strukture, uz neprovar korijena cijelom dužinom zavora. Zavar ploče 1 u cjelini nije zadovoljavajuće homogenosti. Iz radiograma ploče 2 se zaključuje da je zavar u potpunosti homogene strukture, uz potpuni provar korijena. Iz radiograma ploče 3 vidljivo je da je zavareni spoj potpuno nehomogen, uz potpuni provar korijena. Nehomogenost zavora 3 rezultat je prevelike brzine zavarivanja korijenskog prolaza, i neodgovarajućeg nagiba pištolja drugog prolaza.

Iz makroizbrusaka je vidljivo da je najveća zona utjecaja topline zavora 1, što je očekivano s obzirom na najveći unos topline. Isto tako najmanja je zona utjecaja topline zavora 3 zbog najnižeg unosa topline. Najveća je deformacija ploče 3 zbog najvećeg broja prolaza.

Iz rezultata mjerenja tvrdoće je vidljivo da je tvrdoća svakog pojedinog zavara jednolika po presjeku. Različite razine unosa topline nisu značajno utjecale na tvrdoću. Niti u jednom slučaju nije došlo do značajnog povećanja tvrdoće u zoni utjecaja topline u odnosu na tvrdoću metala zavara.

Usporedbom mikrostruktura zavara i zone utjecaja topline s mikrostrukturom osnovnog materijala može se zaključiti da ovaj čelik ima izvrsnu zavarljivost jer nema jako izraženog pogrubljenja mikrostrukturnih zrna u zoni utjecaja topline što bi se loše odrazilo na mehanička svojstva zavarenog spoja. Mikrostrukturu najbližnju osnovnom materijalu ima zavar 1, dok zavar 2 ima najmanja mikrostrukturna zrna, odnosno najbolja mehanička svojstva. Zavar 2 ima usporedno najsitnija mikrostrukturna zrna u zoni utjecaja topline. Iz ovoga se zaključuje da je najkvalitetniji zavar dobiven srednjim unosom topline, odnosno parametrima kojima je izveden zavar 2.

Najveći unos topline rezultirao je povećanim udjelom ferita u mikrostrukтури. Najniži unos topline rezultirao je zavarenim spojem s povećanim udjelom perlita u mikrostrukтури i najgrubljim mikrostrukturnim zrnom. Unos topline nije imao utjecaja na tvrdoću. Na temelju rezultata udarnog rada loma može se zaključiti da je smanjenje unosa topline pri zavarivanju zavara 2 u odnosu na zavar 1 rezultiralo povećanjem udarnog rada loma.

Bazičnim praškom punjene žice jako su osjetljive na točnost parametara zavarivanja. To je vidljivo iz rezultata udarnog rada loma i iz radiograma zavara od kojih je samo jedan zadovoljavajući po pitanju homogenosti.

12. LITERATURA

- [1] Garašić, I.; Remenar, M.; Kutrin, T.: Zavarivanje MIG/MAG promjenjivim polaritetom - posebnosti i primjena, Zavarivanje, siječanj – travanj / vol. 57 / str. 17 – 24, Zagreb, 2014.
- [2] <http://weldguru.com/flux-core/>, pristupljeno 1. svibnja.2018.
- [3] <http://www.lincolnelectric.com/>, pristupljeno 1. svibnja.2018.
- [4] Prednosti visokoučinskog MAG zavarivanja / priredili: Franjo Javor, Ivica Garašić. Zavarivanje, siječanj – travanj / vol. 55 / str. 15 – 20, Zagreb, 2012.
- [5] <https://www.gowelding.org/welding/fcaw-flux-cored-arc-welding/>, pristupljeno 01. lipnja.2018.
- [6] http://www.linde-gas.com/en/processes/cutting_joining_and_heating/welding/flux_cored_arc_welding/index.html, pristupljeno 01. lipnja.2018.
- [7] <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/examining-selfshielded-flux-cored-welding-fcaws-in-highstrength-pipeline-welding-applications-as-an-alternative-to-stick-welding-smaw/>, pristupljeno 01. lipnja.2018.
- [8] ISO 17632: 2004; Dodatni materijali za zavarivanje - samozaštitne praškom punjene žice i praškom punjene žice za zavarivanje pod zaštitom plina za elektrolučno zavarivanje nelegiranih i sitnozrnatih čelika – klasifikacija.
- [9] ISO 17633: 2004; Dodatni materijali za zavarivanje - samozaštitne praškom punjene žice i praškom punjene žice za zavarivanje pod zaštitom plina za elektrolučno zavarivanje nehrđajućih i visoko temperaturnih čelika – klasifikacija.
- [10] Bregant M. Lakota I, Šolar M. Metalne punjene žice, Jesenice, Slovenija. Zavarivanje i zavarene konstrukcije (3/2009), str. 112-118.
- [11] Despotović B, Klarić Š, Kožul A, Samardžić I, Topić V: Analiza tehnološkiosti zavarenih konstrukcija, digitalni udžbenik, SFSB, Slavonski Brod. Dostupno na: http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/mb_dipl1/toc2/2_1.pdf, pristupljeno 22. svibnja.2018.
- [12] http://www.esabna.com/euweb/awtc/lesson7_1.htm/, pristupljeno 1. lipnja.2018.

- [13] Welding Handbook, The American Welding Society, Hialeah-Florida, 1998.
- [14] Kolednjak, D.: Utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [15] Henderieck, G.: Steel weldability, Gietech BV, January 2009, pp. 1 – 31.
- [16] Müschenborn, W. et al.: Proc. Int. Conf. Microalloying '95, Iron and Steel Soc., Pittsburgh PA, 1995, p. 35.
- [17] Kasuya, T; Yurioka, N.: Carbon Equivalent and Multiplying Factor for Hardenability of Steel, The Welding Journal, Vol 6, 1993, pp. 263 – 268.
- [18] Weld defects, ISF Aachen, 2009.
- [19] Kelkar, G.: Weld cracks, WJM Technologies, excellence in material joining, pp. 1-5.
- [20] Kralj, S.; Kožuh, Z.; Garašić, I.; Dorn, L.: Investigation into cold cracking in underwater wet welding of API 5L X70 steel, Transactions of FAMENA (1333-1124) 33 (2009), 3; 25-34.
- [21] Vručinić, G.: Osjetljivost čelika na pojavu hladnih pukotina – metoda ispitivanja implant testom, Zavarivanje 29, 1986.
- [22] Adamczyk, J.: Development of the microalloyed constructional steels, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 14, Issue 1—2, 2006, pp. 9-20.
- [23] Rak, I., Gliha V.: Zavarljivost konstrukcijskih čelika s povišenom čvrstoćom i žilavosti za složena opterećenja, Znanstveno stručni skup "Problemi primjene visokočvrstih čelika", Slavonski Brod, 1989., Zavarivanje 32 (1989), 5-6, 152-160.
- [24] EN ISO 4063: 2012; Zavarivanje i srodni postupci -- Nomenklatura postupaka i referentni brojevi.
- [25] EN 287: 2012: Provjera osposobljenosti zavarivača -- Zavarivanje taljenjem - 1. dio: Čelici.
- [26] http://www.otcdaihenasia.com/product-detail.asp?product_id=36, pristupljeno: 18.lipnja.2018.

- [27] HRN EN 10208-2:1996; Čelične cijevi za cjevovode zapaljivih medija - Tehnički uvjeti isporuke - 2. dio: Cijevi razreda B.
- [28] API 5L, Specification for pipelines, 45th edition, 2012.
- [29] Certifikat materijala čelika API 5L X80, Voestalpine Grobblech GmbH, EN 10204 CR.
- [30] ISO 9692: 2013; Zavarivanje i srodni postupci - Preporuke za pripremu spojeva.
- [31] ISO 15608: 2005; Zavarivanje - Upute za sustav razvrstavanja metalnih materijala.
- [32] Cored wire catalogue; Hobart: dostupno na: http://www.itw-welding.de/fileadmin/user_upload/PDF/Downloads/20140512_ITW_Cored_Wire_Catalogue_ENG.pdf, pristupljeno: 15.lipnja.2018.
- [33] HRN EN 1011-1: 1998; Zavarivanje – preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće upute za elektrolučno zavarivanje.
- [34] Lukačević, Z.: Zavarivanje; Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku - strojarski fakultet - Slavonski brod, Slavonski brod, 1998.
- [35] EN ISO 9016: 2001; Razorna ispitivanja zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje udarnog rada loma – orijentacija, mjesto usjeka i ispitivanje uzorka.
- [36] Ivušić, V.; Franz, M. (2012) Materijali I, podloge za predavanja, FSB, Zagreb.

PRILOZI:

- I. CD – R disc